

N<sup>o</sup> 1

**SUR LA MARCHÉ ANNUELLE**  
**DE L'INTENSITÉ DU RAYONNEMENT SOLAIRE**  
**A VARSOVIE**

ET

**SUR LA THÉORIE DES APPAREILS EMPLOYÉS**

---

**THÈSE DE PHYSIQUE**

*Présentée et publiquement soutenue à la Faculté des Sciences  
de Montpellier*

**le 19 novembre 1906**

PAR

**LADISLAS GORCZYŃSKI**

Né à Bramki (Pologne r.), le 19 mars 1879

*Pour obtenir le grade de Docteur d'Université (mention Sciences)*

---

**MONTPELLIER**

**IMPRIMERIE SERRE ET ROUMÉGOS, RUE VIEILLE-INTENDANCE**

**1906**



N° 1

**SUR LA MARCHE ANNUELLE**  
**DE L'INTENSITÉ DU RAYONNEMENT SOLAIRE**  
**A VARSOVIE**

ET

**SUR LA THÉORIE DES APPAREILS EMPLOYÉS**

---

**THÈSE DE PHYSIQUE**

*Présentée et publiquement soutenue à la Faculté des Sciences  
de Montpellier*

le 19 novembre 1906

PAR

**LADISLAS GORCZYŃSKI**

Né à Bramki (Pologne r.), le 19 mars 1879

*Pour obtenir le grade de Docteur d'Université (mention Sciences)*



---

MONTPELLIER

IMPRIMERIE SERRE ET ROUMÉGOS, RUE VIEILLE-INTENDANCE

—  
1906

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

FACULTÉ DES SCIENCES

Doyen..... DAUTHEVILLE..... *Mécanicationnelle*

Doyens { DE ROUVILLE.  
honoraires { SABATIER.

Professeur honoraire..... CROVA.

Professeurs.... { FLAHAULT..... *Botanique.*  
                      { DE FORCRAND..... *Chimie.*  
                      { FABRY..... *Mathématiques pures.*  
                      { DELAGE ..... *Géologie.*  
                      { MESLIN..... *Physique.*  
                      { CURIE..... *Minéralogie.*  
                      { DUBOSCQ..... *Zoologie.*

Professeurs { OECHSNER DE CONINCK... *Chimie.*  
adjoints { SOULIER..... *Zoologie.*

Maitres { BUHL..... *Mathémat. générales.*  
de conférences { BEAULARD DE LENAIZAN.. *Physique.*  
                      { GIRAN..... *Chimie.*  
                      { MIRANDE..... *Botanique.*  
                      { BOUTROUX..... *Mathématiques.*

Chargés d'un { PAVILLARD..... *Botanique.*  
cours complém. { BAUD..... *Chimie appliquée.*

Secrétaire..... ROCHETTE.

## INTRODUCTION

---

Le présent travail est basé sur les mesures actinométriques et pyrhéliométriques effectuées à Varsovie pendant les cinq années 1901-1905. Il se compose de deux parties, dont la première est consacrée à l'examen théorique et expérimental de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson et à sa comparaison avec le pyrhéliomètre de compensation électrique ; la seconde contient une étude sur les variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire et sur les sommes de la chaleur, tirées des matériaux recueillis.

La première partie (A) est divisée en six chapitres, dont les quatre premiers traitent de l'actinomètre, le cinquième du pyrhéliomètre et le dernier des résultats des comparaisons de ces deux appareils. La discussion des indications des pyrhéliomètres électriques contient, outre les formules et les constantes des appareils, les résultats des calculs des erreurs accidentelles probables, d'après les mesures pyrhéliométriques de Varsovie, qui atteignent le nombre de 1023.

La théorie de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson a nécessité des discussions théoriques et expérimentales beaucoup plus nombreuses que celle du pyrhéliomètre. La raison en est que la théorie de cet appareil, généralement admise jusqu'à présent, nous paraît demander une modification.

La forme incomplète des formules définitives de l'ancienne théorie de l'actinomètre consiste, dans sa partie essentielle, en ce qui suit. Dans l'équation différentielle pour l'état thermique variable, ainsi que dans ses intégrales, on avait pris la température du corps d'après les indications de sa partie thermométrique, c.-à-d. d'après la masse du mercure, tandis que la source réelle des variations thermiques correspond aux surfaces noircies qui absorbent le rayonnement solaire. Une simplification de ce genre serait p. ex. permise pour les bandes très minces du pyrhéliomètre de compensation électrique, mais elle est difficilement admissible pour les corps actinométriques de construction compliquée. Il a donc fallu examiner la distribution de la température dans le corps en question, en prenant surtout en considération l'influence perturbatrice des enveloppes de verre des réservoirs qui séparent les surfaces noircies de la masse du mercure.

Les nouvelles formules se présentent sous la même forme que celles de l'ancienne théorie, mais elles contiennent un nouveau multiplicateur, qui dépend non seulement des propriétés des enveloppes de verre, mais aussi de la valeur du coefficient de la conductibilité calorifique (extérieure), variable avec la température. D'où il se présente déjà cette conclusion (contraire à celle de l'ancienne théorie de l'actinomètre), que l'existence d'une « constante » de l'appareil, susceptible d'être déterminée d'après les comparaisons avec un pyrhéliomètre, ne saurait être admise ; l'actinomètre du système Ångström-Chwolson nécessite la détermination d'une série de « coefficients de transmission », lesquels varient, en général, avec la valeur mesurée.

En outre, on a donné la théorie des erreurs dépendant des intervalles de temps, laquelle semble avoir été négligée jusqu'à

maintenant. Les autres sources d'erreurs qui ont été déjà examinées dans l'ancienne théorie sont discutées brièvement; elles sont suivies des résultats des exemples numériques tirés des matériaux recueillis à Varsovie. Ajoutons que ces derniers contiennent 7622 mesures actinométriques dans 389 jours d'observation.

A la fin de la partie A, sont indiqués les résultats de longues séries de comparaisons des actinomètres avec les pyréliomètres; on a déterminé d'après eux les valeurs des coefficients de transmission pour convertir les données actinométriques en unités absolues. Dans la conclusion, il est indiqué que l'actinomètre du système Ångström-Chwolson permet réellement — à la condition de compléter l'ancienne théorie et de former les moyennes «définitives» — d'obtenir la précision jusqu'à un pour cent; il a donc droit à une juste place parmi les actinomètres de précision.

Il a été indispensable et, en même temps, suffisant d'arriver à ce résultat, fondamental pour nos recherches, pour pouvoir passer à l'étude des variations mensuelles de l'intensité du rayonnement solaire et d'autres problèmes météorologiques qui s'y rattachent. Tout cela fait l'objet de la partie B de ce travail. Cette partie renfermant un nombre assez considérable de résultats particuliers, il nous est impossible de les énumérer ici.

Remarquons seulement que dans le chapitre VII sont déduites les réductions de l'intensité à la hauteur du soleil et à la distance de la terre; de même, on y trouve une évaluation approximative des variations dues à l'influence de l'humidité absolue. Outre ceux de Varsovie, on s'est servi des matériaux des mesures publiés par M. Ångström pour Guimar (île océanique

de Ténériffe), par M. Witkowski pour Zakopane (Galicie) et par M. Westman pour Treurenberg (Spitzberg).

Dans les chapitres VIII et IX, sont étudiées les variations mensuelles de l'intensité, ainsi que la question intéressante de la dépression du rayonnement solaire, qui dura depuis décembre 1902 jusqu'à février 1904. Dans le chapitre X, est donné un schema numérique de la marche annuelle de la radiation pour Varsovie et Treurenberg ; il s'y trouve aussi quelques brèves remarques sur le caractère des variations mensuelles de l'intensité pour l'Amérique du Nord (Providence, Asheville et Black Mountain), pour l'Italie (Modena), pour la Pologne (Zakopane), pour Hald en Jutland, ainsi que pour Montpellier, Lausanne-Clarens, Pawlowsk, Pétersbourg et Ekaterinenbourg.

Dans le dernier chapitre se trouvent les calculs des sommes mensuelles et annuelles de la chaleur en gr. cal., obtenues d'après les mesures de l'intensité du rayonnement solaire et d'après la durée de l'insolation, prises des courbes héliographiques. Dans la table finale sont groupés les résultats obtenus pour Treurenberg, Varsovie et Montpellier.

A la fin est donnée une courte bibliographie des principaux travaux actinométriques jusqu'en 1905, classifiés d'après les noms des auteurs.

---

Bien que les mesures actinométriques et pyréliométriques, qui servent de base au présent travail, aient été effectuées, pendant la période 1901-1905, à l'Observatoire et à la Station Centrale Météorologique de Varsovie, la partie théorique

ainsi qu'une partie des réductions et des calculs a été faite en 1906 à l'Institut de Physique de la Faculté des Sciences de Montpellier.

Nous nous faisons un devoir de rendre à cette place un hommage respectueux et d'exprimer toute notre reconnaissance au savant directeur de cet Institut, M. G. Meslin, ainsi qu'à M. le Doyen S. Dautheville et à MM. Beaulard de Lenaizan et Curie, les très distingués professeurs de la Faculté des Sciences de Montpellier.

Nous présentons aussi nos remerciements sincères à M. Emile Arata-Massa, qui a bien voulu nous aider dans la rédaction française du présent travail dont l'original a été écrit en polonais.

Montpellier, octobre 1906.

Ladislav GORCZYŃSKI.

---



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41555608\\_0036](https://archive.org/details/IA41555608_0036)

## PARTIE A

*Sur le degré de précision des mesures actinométriques et pyrhéliométriques effectuées à Varsovie et sur la variabilité du coefficient de transmission pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.*



## CHAPITRE PREMIER

Sur les méthodes statiques et dynamiques de l'actinométrie et sur la déduction de la formule fondamentale pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.

### § 1. *Relation différentielle principale.*

Les appareils employés en actinométrie se divisent en deux groupes. On donne le nom général de pyréliomètres aux appareils qui servent pour les mesures de l'intensité de la radiation en valeur absolue ; on appelle actinomètres tous les instruments qui donnent les valeurs mesurées en unités relatives, individuelles pour chaque appareil, et qui, par conséquent, nécessitent des comparaisons spéciales avec un appareil du premier groupe. Cette classification, donnée par M. Crova, un savant bien connu en actinométrie, paraît être très utile par suite de nombreuses confusions concernant la dénomination des divers appareils.

Presque tous les actinomètres construits jusqu'à présent sont basés sur la méthode thermométrique. Commençons par établir une équation différentielle, caractéristique pour la question qui va nous occuper.

Dans tout appareil destiné à mesurer le rayonnement solaire, il existe nécessairement un corps qui absorbe la radiation. L'accroissement mesuré de la température de ce corps

dépend surtout de la quantité d'énergie absorbée et aussi de la perte de chaleur que subit le corps en question, pendant le même temps. Nous obtiendrons l'équation différentielle pour l'état thermique variable, en écrivant que la quantité de chaleur, reçue par un corps pendant le temps  $dt$ , est à chaque moment égale à la quantité de chaleur correspondant à l'augmentation de la température du corps à  $dT$ , plus cette quantité d'énergie que perd, pendant le même intervalle  $dt$ , le corps en question.

Pour pouvoir donner à cette relation une forme analytique, susceptible d'une intégration ultérieure, il faut introduire toute une série de conditions restrictives. Il est évident que l'influence éventuelle des différences provenant de la non-parfaite réalisation de ces conditions doit être plus tard soumise à un examen détaillé.

Supposons que sur un corps  $K$  de dimensions finies, dont la surface entière est  $\sigma$  et la capacité thermique  $c$ , tombe un faisceau de rayons solaires avec une section transversale  $s$ . Désignons par  $T$  l'excès  $(T_k - T_c)$  de la «température du corps»  $T_k$  sur la «température du milieu ambiant»  $T_c$ .

Afin que notre supposition concernant la température soit précise, il faut que la condition suivante soit remplie :

A). Toutes les parties du corps soumises à l'action du rayonnement solaire ou laissées dans l'ombre ont à chaque moment donné une seule température qui sera la «température du corps». Nous ne nous occuperons pas des difficultés liées à la conception de la «température du milieu ambiant» et nous admettons que cette température reste constante pendant le temps d'une mesure ou bien, s'il est nécessaire, que le corps est entouré d'une enveloppe maintenue à une température constante.

Puis, il importe d'établir les autres conditions suivantes :

B). La quantité d'énergie  $Q$ , qui arrive à la surface de l'appareil et mesure l'intensité du rayonnement, reste constante dans sa valeur, sa composition et ses conditions d'incidence pendant un intervalle de temps donné (pendant une mesure). En même temps, les conditions atmosphériques et spécialement les courants dans les couches d'air environnant l'appareil doivent rester les mêmes pendant une mesure. Enfin, nous convenons de rapporter  $Q$  à une unité de temps et de surface exposée normalement aux rayons incidents.

C). Le pouvoir absorbant de la surface exposée à la radiation a une valeur constante. En d'autres termes : il existe une relation connue entre la quantité d'énergie  $Q$ , qui arrive à la surface du corps, et la quantité de chaleur (désignons cette quantité par  $q$ ), absorbée par le corps dans le même temps. Sans porter atteinte à la généralité du problème, on pourrait supposer cette relation comme égale à l'unité, en se souvenant que dans le cas où cette relation aurait une autre valeur, différente de 1, il faudrait multiplier le résultat final par cette valeur.

D). La perte de chaleur par un corps donné peut être représentée comme une fonction  $f$ , qui dépend, en général, de la température du corps, de celle du milieu ambiant et de l'intervalle de temps ; elle ne dépend d'aucun autre facteur.

La perte de chaleur, dans un intervalle du temps  $dt$ , peut donc être représentée par une expression de la forme

$$a f(T_k, T_c, t). dt \quad (1)$$

où  $a$  exprime une certaine constante, caractéristique pour le corps donné.

En nous appuyant sur le principe énoncé plus haut et en

supposant que toutes les conditions citées soient remplies, on obtient la formule

$$c dT = q s dt - a f(T_k, T_c, t) dt \quad (2)$$

Cette formule n'est pas commode par suite de la présence d'une fonction inconnue  $f$  ; pour la simplifier, introduisons une supposition supplémentaire sur la forme de cette fonction. Supposons notamment que

D *bis*). La perte de chaleur, sous l'influence de la radiation solaire, soit soumise à la loi de Newton, c'est-à-dire qu'elle soit à chaque moment proportionnelle à la température  $T$  ( $T = T_k - T_c$ ) du corps. D'après cela, l'expression (1) peut être remplacée par

$$\sigma h T dt \quad (3)$$

où  $h$  représente le coefficient de la conductibilité calorifique (extérieure), rapporté à l'unité de température, de surface et de temps. Remarquons que cette condition n'entraîne pas encore la constance du coefficient  $h$ , lequel varie avec la température.

Pour éviter enfin cette dernière difficulté, nous admettons encore que

E). La valeur du coefficient  $h$  reste constante, au moins pendant le temps d'une mesure.

Grâce à ces nouvelles conditions, on peut présenter la relation (2) sous la forme

$$q s dt = c dT + \sigma h T dt \quad (4)$$

facile à intégrer.

§ 2. *Intégration de l'équation et méthode statique de l'actinométrie.*

De la formule (4), on déduit :

1) Pour  $q = 0$  c'est-à-dire quand le corps, après un échauffement préalable, est laissé dans l'ombre, on a

$$\frac{dT}{T} + \frac{\sigma h}{c} dt = 0 \quad (5)$$

d'où l'intégration donne immédiatement

$$T = T_o e^{-mt} \quad (6)$$

Le facteur

$$m = \frac{\sigma h}{c} \quad (7)$$

a été appelé coefficient de refroidissement. A  $m$  s'applique la même condition restrictive, laquelle a été énoncée sub E) pour  $h$ . Enfin

$$T_o = /_{t=0} T \quad (8)$$

2) En désignant par

$$T = T_1$$

la valeur de la température pour  $dT = 0$ , on a

$$q s dt = \sigma h T_1 dt$$

$$\text{d'où} \quad T_1 = \frac{q s}{h \sigma} = \frac{1}{m} \cdot \frac{s}{c} \cdot q \quad (9)$$

et définitivement

$$q = \frac{c}{s} \cdot m T_1 \quad (10)$$

La dernière formule permet d'obtenir la valeur cherchée de  $q$ , quand on connaît le produit  $m T_1$ , parce que les quantités

$c$  et  $s$  peuvent être déterminées préalablement pour l'appareil donné. La relation (10) a servi comme point de départ pour la construction des instruments basés sur la méthode dite statique de l'actinométrie (comme, par exemple, tous les thermomètres de radiation).

Il est facile de voir, a priori, que cette méthode est inexacte. En effet, la quantité  $T_1$  peut être considérée uniquement comme une certaine quantité algébrique et notamment comme une fraction déterminée par la formule (9) : sa détermination par les observations de la température à l'état stationnaire ( $dT = 0$ ) ne saurait être admise, parce que dans ce dernier cas — par suite des grandes valeurs de  $T$  et de la non-constance de  $h$  — les conditions D *bis*) et E) ne sont pas même approximativement remplies et la relation (4) devient illusoire.

Avant d'aller plus loin, remarquons encore les conclusions suivantes tirées de la formule (4), écrite sous la forme

$$m T_1 dt - m T dt = dT$$

$$\text{ou} \quad \frac{dT}{T_1 - T} = m dt \quad (11)$$

Il s'ensuit que

$$T = T_0 e^{-mt} + T_1 (1 - e^{-mt}) \quad (12)$$

$T_0$  a la même valeur que plus haut et notamment

$$T_0 = \lim_{t=0} T \quad (8 \text{ bis})$$

La formule (12) s'applique au cas d'échauffement d'un corps; pour le refroidissement, on a la relation (6).

### § 3. Méthodes dynamiques de l'actinométrie.

L'insuffisance des mesures, faites par la méthode statique, c'est-à-dire en observant les thermomètres actinométriques

dans un état stationnaire, a obligé de mesurer les températures «en mouvement», ce qui caractérise toutes les méthodes dites dynamiques de l'actinométrie.

Si nous nous rappelons la relation fondamentale

$$qsd t = cdT + \sigma hTdt \quad (4 \text{ bis})$$

on voit tout de suite que pour pouvoir déterminer  $q$ , il faut connaître deux facteurs. L'un d'eux est proportionnel à la vitesse d'échauffement d'un corps (en degrés par unité de temps), laquelle peut être trouvée par les observations thermométriques directes ; toute la difficulté consiste dans la détermination du second facteur qui est proportionnel à la vitesse de refroidissement dans le même moment. Cette dernière vitesse échappe aux mesures directes ; il est néanmoins possible de l'éliminer :

I) Ou en observant pour un corps donné non seulement une série d'échauffements, mais aussi — immédiatement après les premiers — une série de refroidissements pour les mêmes excès des températures et pour les conditions extérieures identiques.

II) Ou bien par les observations simultanées de deux corps identiques, dont l'un s'échauffe, tandis que l'autre se refroidit dans les conditions, autant que possible, identiques.

La méthode I est employée pour la plupart des anciens actinomètres ; la méthode dynamique II a été appliquée par M. Ångström à son appareil de 1887, qui a été ultérieurement (en 1893) modifié par M. Chwolson. Les mesures actinométriques de Varsovie ayant été effectuées avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, nous nous occuperons tout spécialement de la méthode dynamique II.

Le point principal pour la méthode Ångström-Chwolson consiste dans la mesure des différences des températures des

deux corps, dont l'un est exposé au soleil, tandis que l'autre se trouve dans l'ombre. Cette multiplication des parties de l'appareil nécessite en même temps de nouvelles conditions restrictives que nous formulons comme il suit :

F). Les deux corps actinométriques exposés l'un après l'autre (ou simultanément) à l'action du rayonnement doivent posséder, outre les mêmes dimensions géométriques, les mêmes capacités calorifiques, les mêmes pouvoirs absorbants et des coefficients de refroidissement égaux à chaque moment.

G). On suppose que, en dehors du rayonnement solaire direct, aucune autre source (positive ou négative) de chaleur n'exerce une influence inégale sur chacun de nos deux corps actinométriques.

En admettant que ces nouvelles conditions soient remplies, on peut sans difficulté déduire les formules pour les observations simultanées des deux corps. Supposons que le premier, ayant une température initiale  $T'_0$  et laissé dans l'ombre, se refroidit, tandis que le second (avec la température initiale  $T''_0$ ) s'échauffe sous l'action du soleil. En désignant par  $T'$  et  $T''$  les températures variables de ces deux corps et par

$$\Theta = T' - T'' \quad (13)$$

leur différence à chaque moment, on cherche tout d'abord une formule pour  $\Theta$  en fonction du temps. Les relations (6) et (12) nous donnent

$$\begin{cases} T' = T'_0 e^{-mt} \\ T'' = T''_0 e^{-mt} + T_1 (1 - e^{-mt}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{d'où il suit} \quad \Theta = \Theta_0 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \quad (15)$$

ce qui représente la formule fondamentale pour la méthode dynamique des deux corps.

§ 4. *Principe actinométrique d'Ångström et méthode des intervalles de temps égaux de Chwolson.*

La formule (15) est applicable à tous les actinomètres basés sur les mesures des différences de température des deux corps identiques, dont l'un est exposé à l'action de la radiation solaire, tandis que l'autre reste dans l'ombre (cette condition étant essentielle pour le principe actinométrique d'Ångström). De la formule (15), passons spécialement au cas, réalisé dans la construction de M. Chwolson, qui, tout en conservant les conditions essentielles pour le principe d'Ångström, a introduit la modification suivante dans la méthode des mesures : pour éliminer les facteurs inconnus et déterminer la valeur cherchée de  $q$  en fonction du temps et des températures observées, on mesure les différences de température des deux corps identiques dans des intervalles de temps égaux (méthode des intervalles de temps égaux de Chwolson).

Remarquons en passant que M. Ångström a employé pour les mesures, faites avec son appareil de 1887, la méthode des différences égales de température ; pour trouver  $q$ , il a mesuré les intervalles de temps.

Pour faire des mesures avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, on prend des intervalles de temps égaux  $t$  et on mesure les valeurs respectives de  $\Theta$ . Soit les différences des températures :  $\Theta_1$  pour le temps  $t = 0$ ,  $\Theta_2$  après l'intervalle du temps  $t$ ,  $\Theta_3$  dans le temps  $2t$ . Ayant ces données ( $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  et  $t$ ), il est facile de trouver  $q$  en leur fonction. En effet, la formule (15) nous donne

$$\begin{cases} \Theta_2 = \Theta_1 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \\ \Theta_3 = \Theta_2 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \end{cases} \quad (16)$$

d'où

$$e^{mt} = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3}; m = \frac{1}{t} \log \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3} \quad (17)$$

et 
$$T_1 = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - 2 \Theta_2 + \Theta_3} \quad (18)$$

En nous rappelant la relation (10), on obtient définitivement

$$q = \frac{c}{s} \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - 2 \Theta_2 + \Theta_3} \cdot \log \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3} \quad (19)$$

Cette formule, en exprimant  $q$  en fonction de  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  et  $t$ , outre des facteurs constants, donne en même temps la solution du problème; elle représente la formule fondamentale pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.

#### § 5. *Simplification de la formule fondamentale pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.*

La formule (19) contient un logarithme naturel et est généralement peu commode pour les calculs. M. Chwolson a montré (dans son mémoire dans «Repertorium für Meteorologie», 1893) qu'il est possible de la simplifier en introduisant les conditions suivantes dans la méthode des mesures :

a) Les valeurs de  $\Theta_1$  et  $\Theta_3$  doivent toujours avoir des signes contraires ; il est aussi désirable que  $\Theta_2$  soit représenté par un petit nombre fractionnaire positif ou négatif.

La condition des signes différents montrant que les différences de température des deux corps changent de signe quand on les compare au commencement et à la fin de la mesure, il s'ensuit que, pendant la mesure même, elles doivent passer par zéro. La pratique montre que la condition a) peut être facilement réalisée.

b) Quant au choix des intervalles de temps, admettons que l'intervalle  $t$ , entre deux lectures consécutives, ne dépasse jamais une minute.

De même, la valeur de  $mt$  ne dépassant jamais, d'après les mesures actinométriques, 0,35, on peut considérer le produit  $mt$  comme une fraction dont les hauts degrés peuvent être négligés.

Ces remarques permettent de simplifier considérablement la formule (19) ; en effet, en posant dans la série

$$\log \frac{1+x}{1-x} = 2 \left( x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \dots \right) \quad (20)$$

$$\frac{1+x}{1-x} = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3} = \frac{a}{b} \quad (21)$$

où, pour la brièveté, on prend

$$\Theta_1 - \Theta_2 = a, \quad \Theta_2 - \Theta_3 = b \quad (22)$$

on a

$$\log \frac{a}{b} = 2 \frac{a-b}{a+b} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{a-b}{a+b} \right)^2 + \dots \right\} \quad (23)$$

En négligeant les degrés supérieurs et en admettant pour les termes entre parenthèses  $\left\{ \dots \right\}$  la relation approximative

$$\frac{a-b}{a+b} = \frac{1}{2} \lg \frac{a}{b} = \frac{1}{2} \log \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3} \quad (24)$$

on déduit de la seconde formule de (17)

$$mt = \log \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3} = 2 \frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \cdot \left( 1 + \frac{1}{12} m^2 t^2 \right) \quad (25)$$

et, d'après (19),

$$q = \frac{2c}{s} \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \cdot \left( 1 + \frac{1}{12} m^2 t^2 \right) \quad (26)$$

Nous montrerons plus loin que, d'après les résultats de

nombreuses mesures actinométriques, on peut, pour la plupart de cas, se borner à calculer  $q$  selon la simple formule

$$q = \frac{2c}{s} \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (27)$$

pour trouver le facteur de correction

$$(1 + \frac{1}{12} m^2 t^2) \quad (28)$$

on se sert de la relation (25) et notamment

$$mt = 2 \frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (29)$$

Enfin, la formule (27) peut être présentée sous la forme

$$q = K \cdot \omega \quad (30)$$

où

$$K = \frac{2c}{s} \quad (31)$$

est considéré, dans la théorie de M. Chwolson, comme une «constante» de l'appareil, tandis que le facteur

$$\omega = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (32)$$

résulte immédiatement de chaque mesure exécutée.

## CHAPITRE DEUXIÈME

Modification de la théorie de l'actinomètre et  
méthode des mesures employées à Varsovie.

### § 6. *Remarques sur la construction des actinomètres du système Ångström-Chwolson.*

Laissant de côté les détails techniques de la construction de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, remarquons que cet appareil <sup>(1)</sup> se compose des parties essentielles suivantes :

1) Deux corps identiques  $Mm$  <sup>(2)</sup> qui reçoivent la radiation ; grâce aux écrans ( $P$ ) convenablement placés devant eux, il est possible d'ombrager l'un des deux, en laissant l'autre sous l'action du rayonnement (principe des deux corps d'Ångström).

2) Ces deux corps actinométriques se composent de deux thermomètres à mercure de forme recourbée ; leurs réservoirs  $M$  en spirale, placés en haut (avec l'échelle en bas), servent à recevoir le rayonnement. Les échelles de ces thermomètres,

---

<sup>(1)</sup> Cet appareil est représenté à la fin de cet ouvrage (voir Pl. I, fig. 2).

<sup>(2)</sup> Voir la dénomination analogue des diverses parties de l'appareil, indiquées dans la fig. 2 (Pl. I).

placées parallèlement, peuvent être au moyen de vis spéciales ( $f$  et  $g$ ) déplacées dans la direction de leur longueur ; en outre, elles portent une grande loupe ( $r$ ) munie d'un fil, ce qui permet de lire à chaque instant avec précision les différences de leur température (condition de la possibilité d'évaluer les différences de température).

3) Pour faciliter l'orientation exacte des surfaces absorbantes vers les rayons incidents, on se sert d'une petite plaque ronde ( $i$ ) avec un écran blanc pour dessiner l'ombre, ainsi que des vis spéciales pour les mouvements azimutaux et méridionaux de l'appareil entier. Enfin, quant aux surfaces absorbantes, elles ont une forme ronde et sont soigneusement noircies (condition de l'incidence normale et de l'absorption de la radiation).

Quant à la construction des réservoirs thermométriques ( $M$ ), qui servent comme récepteurs du rayonnement, ils sont en forme de spirale ; dans ces spirales, passent les longs tubes thermométriques situés perpendiculairement. Ces réservoirs en spirales étaient tout d'abord argentés et puis recouverts, par un procédé galvanoplastique, d'une couche mince de cuivre. L'ensemble est contenu dans un cylindre étroit aux parois de cuivre, dont l'axe est la prolongation des tubes thermométriques mêmes ; la surface latérale extérieure est recouverte d'une couche de noir de platine. Les parties intérieures de ce cylindre, entre la spirale et la surface extérieure noircie et enfumée, sont remplies d'une couche compacte de limaille de cuivre.

### § 7. *Insuffisance de la théorie ancienne de l'actinomètre.*

Toutes les formules données pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, dans les précédents paragraphes, ont été

établies sous la condition (voir § 1) que le corps exposé à l'action de la radiation solaire ou laissé dans l'ombre possède, dans tous ses points, une seule température, considérée comme la «température du corps». Mais, étant donné la construction compliquée et spécifique des corps thermométriques de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, cette supposition est loin d'y être réalisée.

Dans l'actinomètre en question, le réservoir thermométrique est contenu dans un cylindre dont une face extérieure est recouverte d'une substance absorbante ; dans la direction de l'axe cylindrique, est placé un long tube thermométrique avec une échelle. Nous pouvons distinguer ici trois corps différents que nous appellerons brièvement : «corps enfumé», «enveloppe de verre» et «masse de mercure».

Le réservoir étant relativement vaste et le tube ayant une très mince colonne de mercure, on peut négliger l'influence des courants de convection sur la distribution de la température dans la masse du mercure, mais il se pose d'avance une question importante sur l'influence des enveloppes de verre contenant le mercure des thermomètres. Ces «enveloppes de verre» doivent jouer certainement un rôle important, surtout pour la perte de chaleur.

Afin de pouvoir évaluer, dans une certaine mesure, l'influence de cette «enveloppe de verre», admettons que la température de la «masse de mercure» et du «corps enfumé» n'est pas égale à chaque moment par suite de l'influence perturbatrice des enveloppes de verre entourant le mercure. Il s'ensuit immédiatement que, quand un des corps thermométriques s'échauffe au soleil tandis que l'autre se refroidit dans l'ombre, l'égalité des températures constatée dans un moment donné par les thermomètres, n'a pas lieu pour les «enveloppes de verre». Nous voyons donc que, même pour les indications égales des thermomètres actinométriques, les pertes de chaleur

ne seront pas égales pour les deux corps ; le thermomètre qui s'échauffe perd — quand les colonnes de mercure ont la même position dans les deux thermomètres — plus de chaleur que le thermomètre qui se refroidit.

Il est facile de voir que ces différences dans les pertes de chaleur doivent modifier les formules précédemment établies pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson. En effet, la formule fondamentale pour la méthode dynamique des deux corps

$$\Theta = \Theta_0 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \quad (33)$$

et ainsi la formule, qui en dérive, pour calculer  $q$

$$q = \frac{2c}{s} \frac{1}{t} \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} = \frac{2c}{s} \omega = K\omega \quad (34)$$

ont été obtenues par l'intégration des équations différentielles :

$$q \sigma dt = c dT + \sigma h T dt \quad (35)$$

pour le cas d'échauffement d'un corps sous l'action du soleil, et

$$O = c dT + \sigma h T dt \quad (36)$$

pour le refroidissement dans l'ombre, en admettant, dans ces deux cas, les pertes respectives de chaleur comme identiques pour les valeurs égales de  $T$ .

Cette dernière supposition étant inexacte, comme nous l'avons dit tout à l'heure, il importe de modifier les équations (35) et (36), afin d'y introduire un facteur qui dépend de l'influence des enveloppes de verre contenant le mercure des deux thermomètres.

Remarquons, en passant, que dans l'équation (35) on a pris  $q \sigma dt$  au lieu de  $qs dt$  parce que, pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, a lieu la relation

$$s = \sigma \quad (37)$$

§ 8. *Modification de la formule fondamentale pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.*

Pour modifier les formules données par M. Chwolson pour l'actinomètre de sa construction, désignons par  $\psi$  pour le corps échauffé et par  $\varphi$  pour le corps qui se refroidit, la différence entre la température du «corps enfumé» et celle du mercure. Au lieu de l'équation (35) nous aurons

$$q \sigma dt = c dT + \sigma h (T + \psi) dt \quad (38)$$

pour le cas d'échauffement d'un corps sous l'action du soleil.

Pour le cas de refroidissement dans l'ombre, on a, au lieu de (36), l'équation

$$O = c dT + \sigma h (T - \varphi) dt \quad (39)$$

Rappelons que ce que nous appelons brièvement la température représente toujours l'excès de l'indication du thermomètre sur la température du milieu ambiant.

En désignant par  $d$  l'épaisseur de l'enveloppe de verre, par  $k$  sa conductibilité calorifique, on peut admettre que

$$k \frac{\psi}{d} = q - h T$$

ou 
$$\psi = \frac{d}{k} q - \frac{d h}{k} T \quad (40)$$

pour le cas d'échauffement,

et 
$$k \frac{\varphi}{d} = h T$$

ou 
$$\varphi = \frac{d h}{k} T \quad (41)$$

par le cas de refroidissement dans l'ombre.

En introduisant ces valeurs de  $\varphi$  et  $\psi$  dans les formules (38) et (39), on obtient dans le premier cas

$$q \sigma dt = \frac{c}{1 - \frac{d h}{k}} dT + \sigma h T dt \quad (42)$$

et dans le second cas

$$O = \frac{c}{1 - \frac{d h}{k}} dT + \sigma h T dt \quad (43)$$

Les équations différentielles (42) et (43) sont de la même forme que les précédentes (38) et (39) ; leur différence consiste en ce que dans les premières a figuré une certaine constante  $c$  de l'appareil, tandis que maintenant nous avons un certain coefficient

$$\frac{c}{1 - \frac{d h}{k}} \quad (44)$$

qui dépend des propriétés ( $d$  et  $k$ ) de «l'enveloppe de verre», contenant le mercure des thermomètres de l'appareil, et aussi de  $h$  qui, de son côté, varie avec la température.

Nous pouvons donc écrire maintenant la formule (34) sous

la forme  $q = K' \omega \quad (45)$

où la valeur de  $\omega = \frac{1}{t} \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (46)$

dépendant seulement de  $t$  et des différences mesurées de température  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$ , est identique à celle de l'ancienne théorie,

tandis que  $K' = \frac{2c}{s} \frac{1}{1 - \frac{d h}{k}} \quad (47)$

ne représente plus une «constante» pour l'appareil donné,

mais un «coefficient de transmission», variable avec  $h$  <sup>(1)</sup>. Par suite de l'accroissement de  $h$  avec la température, on peut s'attendre à ce que les valeurs du coefficient  $K'$  représentent, au cours de l'année, des variations correspondant approximativement à celles de l'intensité du rayonnement solaire.

En négligeant le facteur

$$\frac{1}{1 - \frac{d h}{k}} \quad (48)$$

comme l'on a fait jusqu'à présent, on introduit une source d'erreurs systématiques, dépendant de  $h$  ainsi que des propriétés des «enveloppes de verre» ( $d, k$ ). Les valeurs numériques de  $\frac{d h}{k}$  peuvent atteindre quelques centièmes, comme le montrent les calculs approximatifs ; il s'ensuit donc qu'on peut présumer d'avance une erreur jusqu'à quelques pour cent, en prenant pour chaque moment les températures d'après les indications des masses du mercure, tandis que la source réelle de l'état thermique variable des corps actinométriques correspond à cette partie de l'appareil que nous avons appelée plus haut «corps enfumé».

En introduisant les «coefficients de transmission» variables  $K'$ , il faut en même temps imposer cette condition que leur détermination ne peut être désormais limitée à un certain

(1) Remarquons que le coefficient  $h$  est considéré comme ayant une valeur constante pendant une mesure avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson (voir condition  $E$  au § 1) et que c'est seulement dans ce cas, très spécial et dans les conditions précisées plus haut, que la déduction de la formule (45), analogue à la formule (34), peut avoir lieu.

Dans le chap. III sont examinées quelques sources d'erreurs provenant des changements éventuels de la valeur de  $h$  (pendant une mesure) ; au § 14 sont présentées quelques solutions particulières de l'équation différentielle de l'état thermique variable, en admettant  $h$  comme fonction de la température. Il va sans dire que dans ce dernier cas l'intégration des équations (35) et (42) ne conduit pas *à priori* à des résultats analogues.

nombre de comparaisons effectuées avec des pyrhéliomètres pendant une courte période, mais qu'ils doivent être déduits de nombreuses comparaisons faites dans des conditions différentes.

Nous verrons plus loin (chapitre VI) que ces prévisions théoriques, concernant le caractère et les variations du «coefficient de transmission» pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, se confirment pleinement par des comparaisons directes des actinomètres avec les pyrhéliomètres de compensation. Les résultats obtenus sur ce point témoignent que la conclusion de l'ancienne théorie sur l'existence d'une constante de l'appareil n'est pas admissible.

La modification de la théorie de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, dont il est question dans le présent chapitre, paraît d'autant plus urgente et nécessaire que de nombreux observateurs, en se basant sur les résultats de l'ancienne théorie, ont jusqu'à présent converti les valeurs relatives fournies par leurs actinomètres en unités absolues, au moyen d'une constante (déduite d'ailleurs d'un petit nombre de comparaisons). Or cela — comme nous le démontrerons plus loin par des mesures et des comparaisons directes — peut entraîner des erreurs jusqu'à 10 pour cent environ et rend généralement les résultats des mesures non comparables <sup>(1)</sup> entre eux.

---

(1) On peut, en effet, démontrer que les longues séries de mesures actinométriques de Pawlowsk (depuis 1893), de Pétersbourg (1895) et d'autres endroits, publiées en gr. cal., ne peuvent pas être considérées comme véritablement exprimées en valeur absolue; elles nécessitent de nouvelles réductions des valeurs relatives, sinon elles ne sont pas comparables.

Cette difficulté de comparaison et même la défectuosité des résultats des mesures anciennes se sont présentées aussi dans les calculs des mesures faites à Varsovie; notamment les données actinométriques de 1901 et 1902 indiquées dans les «Études sur la marche annuelle de l'insolation» (Cracovie, 1903) et aussi dans la note «sur la diminution de l'intensité etc.» (Comptes Rendus, Paris, t. 138) ne peuvent être considérées comme exprimées en gr. cal., pour lesquelles elles

§ 9. *Actinomètres employés à Varsovie.*

Pendant les cinq années 1901-1905, on a fait usage, à Varsovie, des actinomètres suivants (construits dans l'atelier mécanique de M. Ferdinand Müller) :

I) Actinomètre composé des thermomètres NN. 60, 57; échelle de  $-8^{\circ}$  à  $+59^{\circ}$  C., divisée en  $0^{\circ}05$ ; les thermomètres vérifiés en mars 1900.

Cet actinomètre fut employé pour les mesures effectuées en 1901 et 1902 (jusqu'au 4 juin).

II) Actinomètre (NN. 44, 29) avec l'échelle de  $-23^{\circ}$  à  $+35^{\circ}$ . La vérification des thermomètres eut lieu en juin 1897 et en avril 1898.

Cet actinomètre a été employé pour les mesures en 1902 (depuis le mois de juin), en 1903 (excepté la période du 28. VII au 22. X), en 1904 (pendant toute l'année excepté 2. VI-27. VI) et en 1905 (jusqu'à la fin du mois de mai et à partir du 12. IX jusqu'à la fin de l'année).

L'échelle de cet actinomètre ne dépassant pas  $+35^{\circ}$ , on a été obligé de le remplacer par un autre, pendant la période la plus chaude de l'année.

---

y figurent, mais comme des unités relatives différentes pour chaque actinomètre employé. Il s'ensuit évidemment que si de semblables données peuvent même servir pour établir quelques conclusions particulières, elles ne sont guère comparables avec les mesures effectuées par exemple avec un pyrhéliomètre de compensation.

Il va sans dire que les données actinométriques de Varsovie, indiquées pour les premières années de mesures dans les mémoires cités plus haut, ont été calculées de nouveau et converties définitivement en gr. cal. au moyen de « coefficients de transmission ». Ces derniers ont été appliqués directement aux résultats des années suivantes de la période 1901-1905.

III) Actinomètre (NN. 63, 64) avec l'échelle de  $-3^{\circ}$  à  $+55^{\circ}$ ; les thermomètres vérifiés en août 1902 et en février 1903.

On a fait usage de cet actinomètre en 1903 (28. VII-22. X) et en 1904 (2. VI-27. VI).

IV) Actinomètre (NN. 69, 70) avec l'échelle de  $-3^{\circ}$  à  $+55^{\circ}$ ; les thermomètres vérifiés en septembre 1904.

Cet appareil a servi en 1905 pendant la période 11. V-12. IX.

Ajoutons qu'en général les traits de division des thermomètres étaient marqués tous les cinq centièmes du degré; grâce aux dimensions assez considérables de l'échelle et surtout grâce à une loupe mobile spécialement apposée, les lectures ont pu être facilement faites jusqu'à un centième de degré.

Enfin, les corrections des thermomètres actinométriques ont été établies dans des intervalles de  $10^{\circ}$  à  $10^{\circ}$  degrés et réduites aux indications d'un thermomètre à hydrogène.

#### § 10. *Méthode des mesures.*

La méthode des mesures résulte, dans sa partie essentielle, des suppositions faites pendant la déduction de la formule (4) et des simplifications indiquées au § 5. Il faut notamment :

1) Diriger les surfaces absorbantes des thermomètres actinométriques de façon que les rayons tombent dans la direction normale.

2) Placer dans l'ombre l'un des thermomètres, en laissant l'autre sous l'action directe du soleil. L'échauffement de ce dernier thermomètre doit durer jusqu'au moment où la différence des indications des deux thermomètres deviendra telle qu'après le changement consécutif du rôle des thermomètres, leurs températures puissent approximativement s'égaliser dans un intervalle de 60 secondes.

On peut remarquer que cette différence initiale ne dépasse pas quatre degrés et que la condition exposée tout à l'heure peut être remplie sans difficultés pratiques.

3) Changer la position de l'écran de manière que le thermomètre précédemment ombragé vienne subir l'action du rayonnement direct, tandis que l'autre thermomètre, échauffé pendant la première période, reste maintenant dans l'ombre et commence à se refroidir.

4) Quelques secondes après le changement de l'écran (afin d'éviter une certaine inertie des colonnes de mercure, pendant le passage rapide de l'échauffement au refroidissement) on fait, au moyen de la loupe, la lecture simultanée des températures des deux thermomètres, en notant le temps correspondant.

5) Puis, on lit les températures des deux thermomètres dans un intervalle exactement égal à 60 secondes, ainsi qu'après 120 secondes à partir de la première lecture.

De même, pour augmenter l'exactitude du résultat final, il est convenu :

6) De mesurer les différences des températures non seulement après 60 et 120 secondes mais aussi après 30 et 90 secondes à partir de la première lecture. De cette façon, le nombre des lectures thermométriques simultanées s'élève de 3 à 5, mais on obtient ce grand avantage que chaque série de mesures donne deux valeurs de  $q$  indépendantes l'une de l'autre et se contrôlant réciproquement.

7) De faire successivement l'une après l'autre deux séries de mesures dans les directions opposées que nous désignerons par I et II. La direction I signifie que l'échauffement préalable

est subi par le thermomètre de gauche ; la direction II se rapporte au thermomètre de droite. Nous verrons plus loin que cette combinaison des deux mesures consécutives effectuées dans les directions opposées offre de très grands avantages permettant une réduction très notable des erreurs.

Citons un exemple pour expliquer cette méthode des mesures. La formule fondamentale est de la forme

$$q = K' \omega \quad (45 \text{ bis})$$

où  $K'$  représente un coefficient de transmission tandis que le facteur

$$\omega = \frac{1}{t} \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (46 \text{ bis})$$

résulte immédiatement de chaque série des mesures exécutées. Le présent exemple numérique donne une série complète des mesures dans la direction I et une autre série dans la direction II.

Varsovie. 6-VI. 1905. Actinomètre NN. 69, 70.

12<sup>h</sup>48<sup>m</sup> p. Direction I.

|                  | Lectures des thermom. |       | Différences | $\Theta$<br>(Différences corrigées) |
|------------------|-----------------------|-------|-------------|-------------------------------------|
|                  | N. 69                 | N. 70 |             |                                     |
| 0 <sup>s</sup>   | 35°92                 | 33°62 | 2°30        | $\Theta_1 = + 2.28$                 |
| 30 <sup>s</sup>  | 35°57                 | 34°32 | 1°25        | $\theta_1 = - 1.23$                 |
| 60 <sup>s</sup>  | 34°90                 | 34°75 | 0°15        | $\Theta_2 = \theta_2 = + 0.13$      |
| 90 <sup>s</sup>  | 34°51                 | 35°21 | — 0°70      | $\theta_3 = - 0.71$                 |
| 120 <sup>s</sup> | 34°00                 | 35°58 | — 1°58      | $\Theta_3 = - 1.58$                 |

$$\text{D'après trois } \Theta_i \text{ (} t = 1 \text{ min.) : } \omega_1' = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} = 0.938 \quad (49)$$

$$\text{D'après trois } \theta_i \text{ (} t = 0,5 \text{ min.) : } \omega_2' = 2 \frac{\theta_2^2 - \theta_1 \theta_3}{\theta_1 - \theta_3} = 0.918 \quad (50)$$

$$\text{Moyenne } \omega_I = \frac{1}{2} (\omega_1' + \omega_2') = 0.928 \quad (51)$$

12<sup>h</sup>51<sup>m</sup> p. Direction II.

|                  | Lectures des thermom. |       | Différences | $\Theta$<br>(Différences corrigées) |
|------------------|-----------------------|-------|-------------|-------------------------------------|
|                  | N. 69                 | N. 70 |             |                                     |
| 0 <sup>s</sup>   | 33°21                 | 35°21 | — 2°00      | $\Theta_1 = - 2.00$                 |
| 30 <sup>s</sup>  | 33°54                 | 34°60 | — 1°06      | $\theta_1 = - 1.06$                 |
| 60 <sup>s</sup>  | 33°90                 | 33°94 | — 0°04      | $\Theta_2 = \theta_2 = - 0.05$      |
| 90 <sup>s</sup>  | 34°32                 | 33°50 | + 0°82      | $\theta_3 = + 0.81$                 |
| 120 <sup>s</sup> | 34°82                 | 33°18 | + 1°64      | $\Theta_3 = + 1.62$                 |

$$\text{D'après trois } \Theta_i (t = 1 \text{ min.}): \omega_1'' = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} = 0.896 \quad (52)$$

$$\text{D'après trois } \theta_i (t = 0,5 \text{ min.}): \omega_2'' = 2 \frac{\theta_2^2 - \theta_1 \theta_3}{\theta_1 - \theta_3} = 0.921 \quad (53)$$

$$\text{Moyenne } \omega_{II} = \frac{1}{2} (\omega_1'' + \omega_2'') = 0.909 \quad (54)$$

La valeur relative définitive des mesures est égale

$$\omega = \frac{1}{2} (\omega_I + \omega_{II}) = 0.92 \quad (55)$$

en nous bornant, comme toujours pour les valeurs relatives, à deux chiffres décimaux.

#### § 11. *Sur les différences dues à l'application des formules simplifiées aux calculs.*

D'après les relations (19), (26) et (27), nous avons pour calculer  $\omega$ , c'est-à-dire les valeurs relatives de la radiation, les trois formules suivantes:

I) Formule exacte

$$\omega = \frac{1}{2t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3} \cdot \log \text{nat.} \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_3} \quad (56)$$

II) Première formule simplifiée de la forme

$$\omega = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \cdot \left( t + \frac{1}{12} m^2 t^2 \right) \quad (57)$$

où 
$$mt = 2 \frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (58)$$

III) Formule simplifiée définitive

$$\omega = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (59)$$

On se demande quelle est la différence entre les valeurs relatives  $\omega$  de la radiation, calculées d'après chacune de ces formules.

Appliquons nos formules à l'exemple cité plus haut. Les calculs nous donnent :

Direction I.

$$\begin{array}{lcl} \text{I) } \omega_1' = 0.942 & \left\{ \begin{array}{l} mt = 0.228 \\ \frac{1}{12} m^2 t^2 = 0.0044 \end{array} \right. & \text{resp.} \\ \text{II) } \omega_1' = 0.942 & & \\ \text{III) } \omega_1' = 0.938 & & \\ \text{I) } \omega_2' = 0.923 & \left\{ \begin{array}{l} mt = 0.268 \\ \frac{1}{12} m^2 t^2 = 0.0060 \end{array} \right. & \text{d'où } \left\{ \begin{array}{l} \omega_I = 0.933 \\ \omega_I = 0.933 \\ \omega_I = 0.928 \end{array} \right. \\ \text{II) } \omega_2' = 0.924 & & \\ \text{III) } \omega_2' = 0.918 & & \end{array}$$

Direction II.

$$\begin{array}{lcl} \text{I) } \omega_1'' = 0.898 & \left\{ \begin{array}{l} mt = 0.155 \\ \frac{1}{12} m^2 t^2 = 0.0020 \end{array} \right. & \text{resp.} \\ \text{II) } \omega_1'' = 0.898 & & \\ \text{III) } \omega_1'' = 0.896 & & \\ \text{I) } \omega_2'' = 0.923 & \left\{ \begin{array}{l} mt = 0.138 \\ \frac{1}{12} m^2 t^2 = 0.0016 \end{array} \right. & \text{d'où } \left\{ \begin{array}{l} \omega_{II} = 0.911 \\ \omega_{II} = 0.910 \\ \omega_{II} = 0.909 \end{array} \right. \\ \text{II) } \omega_2'' = 0.922 & & \\ \text{III) } \omega_2'' = 0.921 & & \end{array}$$

Les valeurs définitives

$$\omega = \frac{1}{2} (\omega_I + \omega_{II})$$

sont égales respectivement à 0.922, 0.922 et 0.919, c'est-à-dire que dans les trois cas, on peut prendre

$$\omega = 0.92$$

En faisant des calculs identiques pour d'autres séries de mesures effectuées dans des conditions différentes, on obtient le résultat suivant, lequel pourrait être prévu ; notamment :

$\alpha$ ) La formule exacte et la première formule simplifiée conduisent à des résultats qui peuvent être considérés comme sensiblement égaux ; les différences éventuelles ne dépassent pas 0,2 pour cent.

$\beta$ ) Les différences entre la première formule simplifiée et la formule définitive croissent avec  $m$  (ou  $mt$ ) ; cette dernière formule donne systématiquement des valeurs plus petites.

$\gamma$ ) La valeur calculée de  $mt$  variant, presque toujours, dans les limites de 0,1 à 0,3, les différences entre la formule exacte et la formule simplifiée définitive ne dépassent pas un pour cent de la valeur mesurée.

$\delta$ ) En se limitant à deux chiffres décimaux pour le calcul de  $\omega$ , on peut admettre que pour toutes les séries de mesures dans lesquelles

$$mt = 2 \frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} < 0,2 \quad (60)$$

les différences entre les formules I et III sont tout à fait négligeables ; pour les valeurs plus grandes de  $mt$ , on peut éviter les petites différences provenant de la simplification

de la formule, en multipliant les valeurs obtenues par le facteur  $1 + \frac{1}{12} (mt)^2$ .

En comparant les formules (57) et (59), on peut d'avance établir la condition pour que les résultats obtenus par elles concordent jusqu'à un pour cent. Cette condition est évidemment représentée par l'inégalité

$$1 + \frac{1}{12} m^2 t^2 < 0,1 \quad (61)$$

d'où il suit que

$$mt < 0,35 \quad (62)$$

C'est précisément la limite pour  $mt$  que nous avons indiquée au § 5.

De l'exemple cité plus haut ainsi que de beaucoup d'autres, on voit que les différences qui résultent des calculs faits avec les formules simplifiées, ne sont pas moins grandes pour les mesures effectuées dans les intervalles de  $t = 0,5$  min. ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ .) que dans l'intervalle de  $t = 1$  min. ( $\Theta_1, \Theta_2$  et  $\Theta_3$ ).

Ce résultat n'est pas d'accord avec une conclusion citée par M. Chwolson qui estime que les différences pour les valeurs calculées de  $\theta_1, \theta_2$ , et  $\theta_3$ , ne dépassent pas 0,2 pour cent.

---

## CHAPITRE TROISIÈME

### Sur les diverses sources d'erreurs de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.

Dans son travail «Actinometrische Untersuchungen etc.» (Wild's Repertorium für Meteorologie, Vol. 16, N. 5, 1893), M. Chwolson a analysé les diverses sources d'erreurs qui peuvent influencer les données des mesures effectuées avec l'actinomètre en question. Cette analyse se rapporte surtout aux valeurs relatives  $\omega$  et reste applicable malgré la modification de la théorie, indiquée plus haut. Nous énumérons ces diverses sources d'erreurs et nous y ajoutons les résultats des applications numériques d'après les exemples tirés des matériaux actinométriques recueillis à Varsovie, pendant les cinq années 1901-1905.

#### § 12. *Sur les erreurs dues à l'application de la loi de Newton.*

En passant de la formule (2) à la formule (4), nous avons admis que

$$\alpha f(T_k, T_c, t) = \sigma h T \quad (63)$$

en appliquant la loi de Newton (voir la condition D *bis* au § 1). Il est donc nécessaire de s'assurer jusqu'à quel point cette supposition est justifiée pour les mesures actinométriques.

En se basant sur les résultats concordants obtenus par plusieurs physiciens, on peut admettre que — lorsque la différence  $t = T_k - T_c$  entre la température d'un corps et celle du milieu ambiant n'est pas grande, p. ex. ne dépasse

pas 5° ou 6° — la loi de Newton s'accorde bien avec l'expérience. Il importe donc d'étudier tout d'abord quelles étaient, dans les conditions des mesures actinométriques de Varsovie, les différences entre la température initiale du corps préalablement échauffé et la température de l'air environnant, prise au moyen du psychromètre aspirateur d'Assmann.

L'examen fait à ce point de vue pour les longues séries actinométriques obtenues à Varsovie montre que les différences en question, dans des mois différents et pour les diverses conditions atmosphériques, ne dépassent pas, en général, cinq degrés. Quant aux différences maxima des températures des deux corps actinométriques, elles oscillent dans les limites comprises généralement entre 2 et 3 degrés, dépendant de la plus ou moins forte intensité de la radiation.

L'excès de la température d'un corps actinométrique ne peut être d'ailleurs jamais trop grande dans la méthode des deux corps d'Ångström, parce que dans cette méthode le corps préalablement échauffé (< 4 degrés) subit, immédiatement après, un refroidissement. De même, pendant les mesures effectuées à Varsovie, on a fait, après chaque série de 6 mesures consécutives, une courte interruption afin que les températures des corps thermométriques s'égalisassent avec celle du milieu ambiant.

Au cas où l'on ferait cette objection que dans des conditions exceptionnelles l'excès des températures pourrait dépasser 5 degrés, il serait possible de montrer que la formule fondamentale pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson reste encore applicable.

Pour démontrer ce que nous venons d'exposer on peut se servir, d'après M. Chwolson, de l'argumentation suivante :

La supposition (63) signifie géométriquement qu'une certaine fonction

$$F(T) = h T \tag{64}$$

peut être représentée, dans les limites indiquées, par une droite passant par le commencement des axes des coordonnées. Dans le cas où la limite nécessaire n'est plus maintenue (si p. ex. l'excès dépasse 6 degrés), la fonction  $F(T)$  représente une certaine courbe. Mais, étant donné que les différences des températures des deux corps actinométriques ne dépassent pas 2 ou 3 degrés, on peut dans tous les cas considérer la partie de cette courbe, correspondant à ces variations de  $T$ , comme une droite ayant sa direction définie par la tangente dans l'intervalle donné.

L'équation d'une telle droite sera donc de la forme

$$F(T) = h'(T - K) \quad (65)$$

où la dérivée  $h'$  et  $K$  doivent être considérées comme ayant des valeurs constantes. Après cela, notre formule différentielle principale peut être écrite sous la forme

$$q s dt = c dT + \sigma h'(T - K) dt \quad (66)$$

et représente une équation différentielle du même type que la relation (4). Il s'ensuit donc que la formule fondamentale pour la méthode des deux corps

$$\Theta = \Theta_0 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \quad (67)$$

s'applique sans changement à ce nouveau cas et que seulement les valeurs de

$$m = \frac{\sigma h'}{c} \quad \text{et} \quad T_1 = \frac{q s}{h' \sigma} \quad (68)$$

subissent une modification. Cette dernière n'a d'ailleurs aucune influence pour le calcul de  $\omega$  d'après la formule

$$\omega = \frac{1}{t} \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (46 \text{ bis})$$

§ 13. *Sur les erreurs provenant des changements de la valeur de  $h$  pendant une mesure.*

La condition E, formulée au § 1, était que la valeur du coefficient  $h$  doit rester constante, au moins pendant chaque mesure. En réalité, la valeur du coefficient de la conductibilité calorifique (extérieure) peut changer, surtout sous l'influence de deux causes : par suite de changements dans la forme, constitution etc. de la surface absorbante, ou par suite de mouvements et de courants d'air dans le voisinage immédiat de l'appareil. Pour les mesures actinométriques, c'est surtout cette dernière source c.-à.-d. l'influence du vent qui nécessite un examen.

On peut remarquer tout d'abord que l'influence du vent dans les indications des actinomètres basés sur la méthode d'Ångström ne peut être généralement trop grande. En effet, dans cette méthode, les valeurs de  $q$  (ou  $\omega$ ) dépendent non des températures particulières des thermomètres actinométriques mais uniquement de leurs différences ; si donc, pendant une mesure, la vitesse du vent augmente subitement, cela produira cet effet que le thermomètre ombragé commencera à descendre plus vite, mais en même temps le thermomètre qui s'échauffe montera plus lentement de manière qu'une certaine compensation devra se produire. Néanmoins, on ne peut en conclure que cette compensation sera complète et c'est précisément le degré de cette compensation qui va nous occuper.

Pour pouvoir établir les formules relatives à ce cas, il faut spécifier le caractère de la variation de  $h$  ; remarquons que le cas général, c.-à.-d. lorsque les changements de  $h$  deviennent tout à fait irréguliers et violents (coups de vent), échappe presque à l'examen analytique.

Supposons que  $h$  ait une valeur  $h'$  pendant la première moitié (de 0 à  $t$ ) d'une mesure et une autre valeur  $h''$  pendant la seconde moitié (de  $t$  à  $2t$ ). Suivant (67), on a dans ce cas

$$\begin{cases} \Theta_2' = \Theta_1' e^{-m' t} - T_1' (1 - e^{-m' t}) \\ \Theta_3'' = \Theta_2'' e^{-m'' t} - T_1'' (1 - e^{-m'' t}) \end{cases} \quad (69)$$

où les signes ' et '' se rapportent respectivement à la première et à la seconde moitié d'une mesure.

Dans le cas, où  $m$  et  $T_1$  n'auraient pas changé ( $h'$ ,  $m'$ ,  $T_1'$  pendant toute la mesure), on aurait eu au lieu de  $\Theta_3''$

$$\Theta_3' = \Theta_2' e^{-m' t} - T_1' (1 - e^{-m' t}) \quad (70)$$

La différence est donc égale à

$$\begin{aligned} \Delta \Theta_3 = \Theta_3'' - \Theta_3' &= (\Theta_1' + T_1') e^{-m' t} (e^{-m'' t} - e^{-m' t}) + \\ &+ (T_1' - T_1'') (1 - e^{-m'' t}) \end{aligned} \quad (71)$$

en posant  $\Theta_2' = \Theta_2''$  et en prenant pour  $\Theta_2'$  son expression d'après (69).

La différence qui s'ensuit pour les calculs des valeurs actinométriques relatives de  $\omega$  ( $t = 1$  min.) est égale à

$$\Delta \omega = \omega' - \omega'' = \Delta \Theta_3 \cdot \frac{(\Theta_1')^2 - (\Theta_2')^2}{(\Theta_1' - \Theta_3') (\Theta_1' - \Theta_3'')} \quad (72)$$

Afin de se rendre compte de l'erreur qui provient du changement dans  $h$  (ou, ce qui revient au même, dans  $m$  et  $T_1$ ) pendant une mesure, prenons quelques exemples numériques. Pour nous servir des formules (71) et (72), il faut admettre les valeurs de  $m'$ ,  $m''$ ,  $T_1'$ ,  $T_1''$  et  $\Theta_1'$ . D'après les matériaux recueillis à Varsovie, on voit que  $m$  varie entre 0,1 et 0,35 et que  $\Theta_1'$  oscille généralement entre 2° et 3°. Quant à  $T_1$ , c'est une quantité algébrique, donnée par la formule

$$T_1 = \frac{q^s}{h^s} = \frac{q^s}{c^s m} \quad (73)$$

et inversement proportionnelle à  $m$ .

Pour se faire une idée des valeurs numériques qui peuvent être attribuées à  $T_1$ , on peut se servir de l'argumentation suivante. Les observations nous montrent que l'intensité du rayonnement solaire ne dépasse pas à Varsovie 1,5 gr. cal. (d'ailleurs, le nombre est aussi le même pour d'autres endroits, pas trop élevés).

D'autre part, le facteur  $\frac{2c}{s}$  ne diffère pas beaucoup de 1, comme le montrent les comparaisons des pyrhéhomètres avec les actinomètres. On peut donc admettre

$$q < 1,5; \quad \frac{2c}{s} < 1 \quad \text{d'où} \quad m T_1 < 3 \quad (74)$$

Nous en concluons que pour  $m = 0,15$ ,  $T_1 < 20$ ; pour  $m = 0,25$ ,  $T_1 < 12$ ; pour  $m = 0,35$ ,  $T_1 < 8,6$ .

*Exemple I.*  $\Theta_1' = 2^{\circ}.00$ ,  $t = 1$ ;  $m' = 0,15$ ,  $T_1' = 12,5$ ;  $m'' = 0,20$ ,  $T_1'' = \frac{0,15}{0,20} 12,5 = 9,375$ .

D'après (69) et (70) on obtient:  $\Theta_2' = -0^{\circ}0196$ ,  $\Theta_3' = -1^{\circ}761$ ,  $\Theta_3'' = -1^{\circ}715$ ; donc  $\Delta \Theta_3 = +0^{\circ}046$ . Puis  $\omega' = 0.937$ ,  $\omega'' = 0.923$ ;  $\omega' - \omega'' = 0.014$ .

La même différence, calculée d'après (72), donne  $\Delta \omega = \omega' - \omega'' = 0,014$ , ce qui représente presque 1,5 pour cent de la valeur mesurée (variation admise de  $m$ , pendant la mesure, dépassant 30 pour cent).

*Exemple II.* — L'exemple précédent se rapportant aux valeurs relativement petites de la radiation, les données actuelles s'appliquent à l'intensité plus forte du rayonnement solaire.

Nous posons:  $\Theta_1' = 3^{\circ}20$ ,  $t = 1$ ;  $m' = 0.30$ ,  $T_1' = 10,0$ ;  $m'' = 0,25$ ,  $T_1'' = \frac{0,30}{0,25} 10 = 12$ .

On aura, dans ce cas:  $\Theta_2' = -0^{\circ}221$ ,  $\Theta_3' = -2^{\circ}755$ ,

$\Theta_3'' = -2^{\circ}826$ , d'où  $\Delta \Theta_3 = -0^{\circ}071$ . Puis  $\omega' = 1.489$ ,  $\omega'' = 1.508$ ;  $\omega' - \omega'' = -0.019$ .

La même différence, calculée d'après (72), nous donne  $\Delta \omega = -0.019$  ce qui représente ca. 1,4 pour cent (variation de  $m$  dépassant 15 pour cent).

D'après les discussions et les exemples cités, on voit que l'influence du vent représente une source d'erreurs accidentelles lesquelles peuvent dépasser p. ex. un pour cent; les coups de vent violents auront probablement un effet encore plus considérable. L'introduction des corrections relatives à ce cas étant très incommode et difficile, il importe de prendre certaines précautions concernant le lieu et l'orientation de l'appareil afin d'éviter tous les changements trop brusques dans la force du vent. On peut remarquer que ces précautions ne sont pas pratiquement difficiles à réaliser et ne nécessitent pas, en général, des installations spéciales.

Quant aux mesures effectuées à Varsovie, ajoutons que dans la première année (1901), quand les appareils fonctionnaient sur la terrasse de l'Observatoire, situé près du grand parc l'environnant, l'influence des coups de vent se faisait sentir quelquefois pour les vents venant de l'est; on fut même obligé de supprimer quelques mesures effectuées dans ces conditions. Mais, dans les quatre années suivantes, lorsque le lieu d'observation fut établi sur la terrasse supérieure de la Station Centrale Météorologique de Varsovie, cet effet défavorable du vent ne fut plus remarqué.

§ 14. *Sur les erreurs dues à la non-parfaite égalité du coefficient  $h$  pour les deux corps, par suite des différences de leurs températures.*

Pendant chaque mesure, les températures des deux corps

actinométriques ne sont pas, en général, égales entre elles et ces différences peuvent atteindre facilement, au commencement et à la fin des lectures, 3 degrés. D'un autre côté, la valeur du coefficient  $h$  dépend de la température et croît notamment avec la dernière. Soit  $h_0$  la valeur de la conductibilité pour une température donnée  $\tau$ ; on peut admettre, pour les variations de  $h$ , la formule

$$h = h_0 \{ 1 + \alpha (T - \tau) \} \quad (75)$$

où  $\alpha$  représente un certain coefficient dont la valeur pour les divers corps et milieux est relativement peu connue; dans les conditions que nous considérons dans cet examen, admettons approximativement

$$\alpha = 0,01 \quad (76)$$

Quant à la valeur numérique de  $h$ , on peut remarquer que ce dernier coefficient ne dépassait pas, en général, pendant les mesures actinométriques à Varsovie, 0,2. Cette limite, on l'obtient en prenant la formule  $m = h \frac{\sigma}{c}$  et en nous rappelant que  $m < 0,35$  et que  $\frac{2\sigma}{c}$  ne diffère pas beaucoup de 1.

Revenant aux mesures, considérons deux corps, l'un desquels se refroidit dans l'ombre, après avoir subi un échauffement préalable (p. ex. à 3°), tandis que l'autre s'échauffe sous l'action directe des rayons solaires. Par rapport aux différences observées de température de ces deux corps, on peut distinguer deux périodes: l'une, dans laquelle le corps, préalablement échauffé, a constamment une température supérieure à celle de l'autre; cette période dure jusqu'au moment de l'égalisation des deux températures. L'autre période, de caractère opposé, s'étend du moment de l'égalisation jusqu'à la fin de la mesure.

Quoique le cas du changement de  $m$  (ou de  $h$ , ce qui

revient au même), considéré au § 13, ne correspond pas à celui qui nous occupe maintenant, ils ont une analogie importante que nous allons indiquer. Si l'on suit les variations des valeurs des différences  $\Theta$  de température de deux corps actinométriques, on est frappé par ce fait que les différences initiales  $\Theta_1$  sont constamment plus grandes que les différences finales  $\Theta_3$ ; il s'ensuit que, en comparant les deux périodes de mesure citées plus haut, nous aurons une asymétrie dans une direction constante. Or, c'est le cas qui correspond à celui du § 13.

Les différences entre  $\Theta_1$  et  $\Theta_3$  sont évidemment plus petites que  $\Theta_1$ ; supposons qu'elles aient une valeur de  $2^\circ$ , ce qui est certainement une valeur plutôt grande. Dans le § 13, nous avons vu que, dans le cas d'une forte radiation, la variation de  $m$  de 15 pour cent, pendant une mesure, entraîne une erreur ne dépassant pas 1,5 pour cent de la valeur mesurée. Dans notre cas actuel, la valeur de  $m$  (ou  $h$ ) ne variant pas plus que ca. 2 pour cent, on peut prévoir que les différences en provenant, dans la détermination de  $\omega$ , ne dépassent pas 0,2 pour cent environ.

D'où cette conclusion que les erreurs provenant de la non parfaite égalité du coefficient  $h$ , par suite des différences de leurs températures, sont négligeables dans les limites de précision jusqu'à 0,01 gr. cal.

Il est intéressant de constater que cette évaluation empirique, de caractère approximatif, est conforme aux résultats théoriques obtenus par M. Chwolson (l. c.), en intégrant l'équation différentielle

$$c \, dT = qs \, dt - \sigma \, h_0 \, T [1 + \alpha (T - \tau)] \, dt \quad (77)$$

où  $h$  est considéré comme une fonction de la température d'après (75). Nous donnerons très brièvement les formules en question en distinguant les cas de refroidissement et d'échauffement.

1) Cas de refroidissement dans l'ombre.

Dans ce cas  $q = 0$  ; M. Chwolson pose

$$T = T_o e^{-mt} + V \quad (78)$$

Pour trouver  $V$ , il remplace  $T$  dans (77) par (78), en négligeant  $V$  dans le troisième terme. L'intégration de l'équation

$$\frac{dV}{dt} + mV + \alpha m T_o e^{-mt} (T_o e^{-mt} - \tau) \quad (79)$$

donne, en tenant compte de la condition supplémentaire

$$\left. \frac{dV}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad (80)$$

que

$$T = T_o e^{-mt} - \alpha T_o e^{-mt} [T_o (1 - e^{-mt}) - mt\tau] \quad (81)$$

Quand  $h$  est constant  $\alpha = 0$ , la formule (81) donne

$$T = T_o e^{-mt} \quad (6 \text{ bis})$$

c.-à.-d. l'expression que nous avons déjà établie.

2) Dans le cas d'échauffement, on a l'équation différentielle

$$\frac{dT}{dt} - m(T_1 - T) + \alpha m T(T - \tau) = 0 \quad (82)$$

qui résulte de (77), en y introduisant les quantités connues de  $m$  et  $T_1$ . En posant, d'une manière analogue,

$$T = T_o e^{-mt} + T_1 (1 - e^{-mt}) + W \quad (83)$$

on a pour déduire  $W$

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} + mW + \alpha m [T_o e^{-mt} + T_1 (1 - e^{-mt})] \cdot \\ \cdot [T_o e^{-mt} + T_1 (1 - e^{-mt}) - \tau] \end{aligned} \quad (84)$$

En formant les séries pour  $e^{mt}$  et  $e^{-mt}$  et en négligeant les termes supérieurs au 3<sup>e</sup> degré, M. Chwolson présente l'expression pour  $W$  sous la forme

$$W = -\alpha (T_1 - T_o) e^{-mt} \left[ T_1 \frac{m^3 t^3}{2} + T_o \left( \frac{m^2 t^2}{2} - \frac{m^3 t^3}{6} \right) \right] + \\ + \alpha (\tau - T_o) e^{-mt} \left[ T_1 \left( \frac{m^2 t^2}{2} + \frac{m^3 t^3}{6} \right) + T_o m t \right] \quad (85)$$

Pour  $\alpha = 0$ , on obtient  $W = 0$ , c.-à.-d. que le facteur de correction disparaît. Dans ce dernier cas, on a

$$T = T_o e^{-mt} + T_1 (1 - e^{-mt}) = T_1 - (T_1 - T_o) e^{-mt} \quad (12 \text{ bis})$$

c. à.-d. la formule, déduite déjà au § 2.

*Exemple numérique.* — Appliquons les formules déduites tout à l'heure aux cas concrets des mesures actinométriques de Varsovie. Prenons comme différence initiale  $\Theta_1 = 3^{\circ}00$ , et supposons que le premier thermomètre est échauffé à  $6^{\circ}$  (au-dessus du milieu ambiant) ; ces données correspondent aux mesures effectuées dans la direction II et aux valeurs relatives de la radiation solaire observées généralement à Varsovie pendant les mois d'été et au mois de septembre. Soit  $m = 0,30$  pour le moment du milieu de la mesure, quand les températures des deux thermomètres actinométriques sont à peu près égales ; enfin, admettons  $\tau = 4^{\circ}4$  et  $T_1 = 8,5$ .

a) Les formules habituelles (6 bis) et (12 bis) donnent :

|           | $T''$          | $T'$           |                             |
|-----------|----------------|----------------|-----------------------------|
| $t_o = 0$ | $6^{\circ}$    | $3^{\circ}$    | $\Theta_1 = + 3^{\circ}$    |
| $t = 1$   | $4^{\circ}445$ | $4^{\circ}425$ | $\Theta_2 = + 0^{\circ}020$ |
| $2t = 2$  | $3^{\circ}293$ | $5^{\circ}482$ | $\Theta_3 = - 2^{\circ}189$ |

$$\text{d'où} \left\{ \begin{array}{l} m = 0.297 \\ m T_1 = 2 \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \frac{1}{t} \left( 1 + \frac{1}{12} m^2 t^2 \right) = \\ \qquad \qquad \qquad = 2.532 (1 + 0.0075) \\ \omega = \frac{1}{2} m T_1 = 1.266 (1 + 0.0075) = 1.275 \end{array} \right.$$

b) Les formules (78) et (83), avec les termes de corrections  $V$  et  $W$ , donnent :

|                                           | $T''$                                                                                                    | $T'$                         |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| $t_0 = 0$                                 | $6^\circ$                                                                                                | $3^\circ$                    |
| $t = 1$                                   | $4^\circ 445 - 0.893 \alpha$                                                                             | $4^\circ 425 + 0.453 \alpha$ |
| $2t = 2$                                  | $3^\circ 293 - 0.131 \alpha$                                                                             | $5^\circ 482 - 1.142 \alpha$ |
|                                           |                                                                                                          | pour $\alpha = 0.01$         |
| $\theta_1 = + 3^\circ$                    |                                                                                                          | $\theta_1 = + 3^\circ$       |
| $\theta_2 = + 0^\circ 020 - 1.346 \alpha$ |                                                                                                          | $\theta_2 = + 0^\circ 007$   |
| $\theta_3 = - 2^\circ 189 + 1.011 \alpha$ |                                                                                                          | $\theta_3 = - 2^\circ 179$   |
| d'où                                      | $\left\{ \begin{array}{l} m = 0.312 \\ m T_1 = 2.524 (1 + 0.0081) \\ \omega = 1.272 \end{array} \right.$ |                              |

La différence entre  $\omega$ , dans les deux cas, est égale à 0,2 pour cent.

#### § 15. *Sur les erreurs dues aux changements de la valeur de la radiation solaire pendant une mesure.*

L'intensité du rayonnement solaire mesuré à la surface de la terre présentant même pour le ciel en apparence pur des variations fréquentes, quoique en général faibles, ces dernières peuvent atteindre, dans des conditions peu favorables, des valeurs assez grandes. Il est bien entendu que dans ce dernier cas les mesures deviennent moins certaines et ne doivent pas être effectuées.

A Varsovie, ainsi que dans d'autres endroits, les mesures de la radiation ne s'effectuant que dans les jours suffisamment clairs, on peut se borner, dans notre discussion, aux variations moins grandes, qui ne dépassent pas un maximum p. ex. de  $\pm 5$  pour cent de la valeur initiale de la radiation solaire.

Pour faciliter l'emploi de formules, admettons que la variation en question a eu lieu non successivement, mais subitement; soit  $q$  sa valeur pendant la première moitié de la mesure, tandis que pendant la seconde moitié, elle est  $q(1+k)$ ,  $k$  représentant un petit nombre fractionnaire, positif ou négatif.

Supposons que dans ces conditions on a mesuré trois différences:  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$  des températures des deux corps actinométriques; on en obtient la valeur relative de la radiation au moyen de la formule habituelle

$$\omega = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (86)$$

$t$  étant égal à 1. Mais, dans nos conditions de mesure, on a les relations

$$\begin{cases} \Theta_2 = \Theta_1 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \\ \Theta_3 = \Theta_2 e^{-mt} - T_1 (1 + k) (1 - e^{-mt}) \end{cases} \quad (87)$$

d'où il résulte immédiatement que la valeur de  $\omega$ , calculée d'après (86), ne peut être exacte et que l'erreur correspondante peut être exprimée comme

$$\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) = \omega - \frac{1}{2} \left[ \frac{(\Theta_2)^2 - \Theta_1 \Theta_3'}{\Theta_1 - \Theta_3'} + \frac{(\Theta_2'')^2 - \Theta_1 \Theta_3''}{\Theta_1 - \Theta_3''} \right] \quad (88)$$

où les nouvelles différences

$$\begin{cases} \Theta_3' = \Theta_2 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \\ \Theta_2'' = \Theta_1 e^{-mt} - T_1 (1 + k) (1 - e^{-mt}) \\ \Theta_3'' = \Theta_2'' e^{-mt} - T_1 (1 + k) (1 - e^{-mt}) \end{cases} \quad (89)$$

se calculent d'après les valeurs mesurées de  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$ .

Les dernières relations conduisant à des formules très compliquées, il semble avantageux de présenter le problème de la façon suivante.

Au lieu de calculer les valeurs relatives de  $\omega$ , séparément

d'après  $T_1$ , pour la première et pour la seconde moitié de la mesure, puis de prendre les moyennes et de les comparer avec  $\omega$ , déduit indirectement, on peut déterminer immédiatement la valeur intermédiaire relative, d'après la formule

$$\omega' = \frac{(\Theta_2')^2 - \Theta_1 \Theta_3'}{\Theta_1 - \Theta_3'} \quad (90)$$

$$\text{où} \quad \begin{cases} \Theta_2' = \Theta_1 e^{-mt} - T_1(1 + k')(1 - e^{-mt}) \\ \Theta_3' = \Theta_1 e^{-2mt} - T_1(1 + k')(1 - e^{-2mt}) \end{cases} \quad (91)$$

$k'$  représentant une fraction intermédiaire entre  $O$  et  $k$  (égale par exemple à  $\frac{k}{2}$ ).

La valeur cherchée de l'erreur est égale à la différence

$$\Delta \omega = \omega - \omega' \quad (92)$$

laquelle doit être exprimée en fonction des températures mesurées  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$  et des coefficients admis  $k$  et  $k'$ .

Des formules (87) on trouve facilement

$$T_1 = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3 + k(\Theta_1 - \Theta_2)} \quad (93)$$

$$e^{mt} = \frac{(\Theta_1 - \Theta_2 + k\Theta_1) \cdot (\Theta_1 - \Theta_2)}{\Theta_1 \Theta_2 - \Theta_3(\Theta_1 - \Theta_2) + k\Theta_2(\Theta_1 - \Theta_2)} \quad (94)$$

En substituant ces expressions dans les équations (91), on exprime  $\Theta_2'$  et  $\Theta_3'$  en fonction des  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$ ,  $k$  et  $k'$  et, en calculant  $\omega'$ , on obtient  $\Delta \omega$  d'après (92).

L'application de ces formules pour les exemples numériques n'offre pas de difficultés; cependant la formule définitive pour  $\Delta \omega$  se présente sous une forme beaucoup plus simple, si l'on admet  $\Theta_2 = O$ . C'est une condition qui, en simplifiant notablement les formules, ne porte que peu d'atteinte à la généralité du problème. En effet, on sait que les différences initiales  $\Theta_1$  sont choisies de manière que la

différence suivante  $\Theta_2$  soit la plus petite possible (voir § 5); les mesures directes montrent que  $\Theta_2$  ne dépasse que rarement trois ou quatre dixièmes de degré.

Pour  $\Theta_2 = 0$ , on a

$$T_1 = \frac{-\Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 + \Theta_3 + k \Theta_1}; e^{mt} = - \frac{\Theta_1}{\Theta_3} (1 + k) \quad (95)$$

En introduisant ces expressions dans les formules (87), on obtient

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_2' = \frac{k'}{1+k} \cdot \Theta_3 \\ \Theta_3' = \frac{1+k'}{1+k} \cdot \Theta_3 - \frac{k'}{(1+k)^2} \cdot \frac{(\Theta_3)^2}{\Theta_1} \end{array} \right. \quad (96)$$

L'erreur cherchée peut être présentée sous la forme

$$\Delta \omega = \omega - \omega' = \Theta_3 \frac{1}{\frac{\Theta_3}{\Theta_1} - 1} - \left( \frac{1+k'}{1+k} \cdot \Theta_3 \right) \cdot \frac{1}{\frac{1+k'}{1+k} \cdot \Theta_3 - 1 - \frac{k'}{(1+k)^2} \left( \frac{\Theta_3}{\Theta_1} \right)^2} \left( 1 + \frac{k}{1+k} \cdot \frac{-\Theta_3}{\Theta_1} \right) \quad (97)$$

De la formule pour  $\Delta \omega$ , ainsi présentée, on voit facilement que pour  $k = k' = 0$ ,  $\Delta \omega = \omega - \omega' = 0$ , résultat qu'on devrait attendre a priori; puis, pour les valeurs positives de  $k$  ( $k > k' > 0$ ),  $\Delta \omega$  devient négative, tandis que pour les valeurs négatives de  $k$  ( $k < k' < 0$ ), la différence  $\Delta \omega$  devient positive.

De ce que nous venons de dire, résultent les conclusions suivantes :

1) Dans le cas où l'intensité du rayonnement solaire augmente durant une mesure, l'actinomètre donne des valeurs relatives, inférieures à la moyenne calculée pour ce temps.

*Exemple.* — Soit  $\Theta_1 = 3^\circ$ ,  $\Theta_2 = 0$ ,  $\Theta_3 = -2^\circ$  et supposons que la radiation a augmenté subitement de 5 pour cent pendant la mesure; on admet que  $k = + 0.05$ , en prenant pour  $k' = + 0.025$ . Les formules (86) et (97) donnent :  $\omega = 1,20$ ,  $\Delta \omega = -0,013$ , ce qui représente 1,1 pour cent de la valeur mesurée.

2) Dans le cas de diminution de l'intensité, l'actinomètre fournit des valeurs relatives, supérieures à la moyenne pour le même temps.

*Exemple.* — En conservant les nombres précédents et en supposant  $k = - 0.05$ ,  $k' = - 0.025$ , on a  $\omega = 1,20$ ,  $\Delta \omega = + 0.033$ , ce qui donne 2,8 pour cent de la valeur mesurée.

Les mêmes résultats s'obtiennent en calculant les valeurs d'après (91) ou (88). Les différences pour les cas de diminution de l'intensité sont toujours plus grandes que pour les cas d'augmentation.

L'expérience de cinq années de mesures, à Varsovie, montre que dans les conditions habituelles des mesures actinométriques, les variations de l'intensité du rayonnement, quoiqu'elles se produisent fréquemment, ne se présentent pas cependant sous forme de changements brusques. Elles oscillent lentement de manière que, pendant 2,5 minutes nécessaires pour une mesure, la variation de 5 pour cent ne peut être qu'exceptionnelle; de telles variations peuvent résulter de causes, déjà immédiatement visibles pour l'observateur. Enfin, l'expérience nous montre que ces oscillations ont un caractère accidentel et variable, de manière que leur influence sur les valeurs actinométriques calculées se réduira certainement, en prenant les moyennes de quelques mesures. Nous verrons plus loin qu'il y a aussi d'autres causes qui militent en faveur de cette formation des moyennes d'après quelques mesures consécutives.

§ 16. *Sur les erreurs dues à la non-parfaite identité des deux corps actinométriques.*

En appliquant pour la théorie de l'actinomètre le principe d'Ångström des deux corps, nous avons énoncé la condition (désignée par F au § 3) que les deux corps actinométriques doivent, outre les mêmes formes géométriques, posséder les mêmes propriétés physiques et surtout, à chaque moment, les mêmes valeurs du coefficient de conductibilité (ou de refroidissement) et toujours les mêmes capacités thermiques et les mêmes pouvoirs absorbants. Ces conditions ne pouvant être idéalement remplies, il importe d'étudier l'influence des écarts éventuels sur les indications de l'actinomètre.

Par suite de la symétrie de la construction des deux corps thermométriques, on est d'avance conduit à cette conclusion que, en répétant la mesure dans deux directions opposées, on réduira l'influence de la non-parfaite identité. Par rapport aux mesures actinométriques, cela signifie que, si pendant une mesure le thermomètre de gauche, préalablement échauffé, subissait le refroidissement (direction I), pendant la mesure suivante c'est le thermomètre de droite qui devrait subir le refroidissement (direction II).

Il est évident que la moyenne des deux mesures consécutives dans les directions opposées, contribuera à compenser l'influence des erreurs en question ; il reste seulement à examiner jusqu'à quel degré cette compensation sera complète.

A). En nous occupant d'abord des valeurs relatives de la radiation, supposons qu'il existe une différence dans le coefficient  $h$  (et, par conséquent, dans  $m$  et  $T_1$ ) pour les deux corps par suite de leur non-parfaite identité.

Soit notamment :  $h'$ ,  $m'$ ,  $T_1'$  pour le premier corps et  $h''$ ,  $m''$ ,  $T_1''$  pour le second ; puis, supposons que (pour la mesure dans la direction I) le premier thermomètre a une température  $T'$  (excès sur celle du milieu ambiant), le second  $T''$  et que leur différence  $T' - T'' = \Theta_1$ . Les mêmes différences, après le temps  $t$  et  $2t$ , seront  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$ , et la valeur relative de  $\omega$ , qui en résulte,

$$\omega_1 = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (98)$$

Cette valeur de  $\omega_1$  n'est pas tout à fait exacte parce que les valeurs de  $m$  et  $T_1$  ne sont pas les mêmes pour les deux corps, tandis que leur égalité est nécessaire pour la déduction de la formule (98).

Les différences entre les deux corps étant petites, on peut admettre que la valeur réelle de  $\omega$  est égale à

$$\omega = \omega_1 + \frac{\partial \omega_1}{\partial \Theta_2} \Delta \Theta_2 + \frac{\partial \omega_1}{\partial \Theta_3} \Delta \Theta_3 \quad (99)$$

Dans cette formule  $\Delta \Theta_2$  et  $\Delta \Theta_3$  correspondent aux changements dans les valeurs de  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$  (pour  $\Theta_1$  donnée), qui auraient été observées si les propriétés physiques des deux corps avaient été rigoureusement identiques.

Pour calculer  $\omega$ , remarquons que

$$\Delta \Theta_2 = T' (e^{-m' t} - e^{-m'' t})$$

ou avec une approximation suffisante

$$\Delta \Theta_2 = T' (m'' - m') t \quad (100)$$

De même

$$\Delta \Theta_3 = T' (e^{-2m' t} - e^{-2m'' t})$$

ou

$$\Delta \Theta_3 = 2 T' (m'' - m') t \quad (101)$$

La différenciation de la formule (98) nous donne

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial \Theta_2} = \frac{2 \Theta_2}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \omega_1}{\partial \Theta_3} = - \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \quad (102)$$

En substituant ces données en (99), on obtient

$$\omega = \omega_1 - 2 T' t (m'' - m') \left[ \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} - \frac{\Theta_2}{\Theta_1 - \Theta_3} \right] \quad (103)$$

Le facteur entre parenthèses [ ] représente un nombre fractionnaire qui d'après les matériaux des mesures actinométriques ne diffère pas beaucoup de 1/4. On peut donc poser

$$1 + \varepsilon = t \left[ \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} - \frac{\Theta_2}{\Theta_1 - \Theta_3} \right] \quad (104)$$

où  $\varepsilon$  représente une petite fraction, positive ou négative.

En répétant la même discussion pour la direction II, on obtient une nouvelle formule pour la différence entre  $\omega$  et  $\omega_{II}$  ; nous aurons donc ensemble

$$\begin{cases} \omega_I = \omega + \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_I) t (m'' - m') T_I' \\ \omega_{II} = \omega - \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_{II}) t (m'' - m') T_{II}'' \end{cases} \quad (105)$$

où les index I et II se rapportent aux valeurs pour la direction I et II. Remarquons que les formules (105) permettent, au point de vue théorique, d'évaluer la différence  $m'' - m'$ .

En prenant la moyenne, on a

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{2} (\omega_I + \omega_{II}) - \frac{1}{4} (m'' - m') t \cdot \\ &\quad \cdot [(1 + \varepsilon_I) T_I' - (1 + \varepsilon_{II}) T_{II}''] \end{aligned} \quad (106)$$

où le dernier terme représente le terme de correction.

Pour évaluer l'erreur provenant de ce terme, introduisons-y les valeurs probables des divers facteurs particuliers qui y figurent.

Les matériaux des mesures actinométriques de Varsovie montrent que le facteur entre parenthèses  $[\quad]$  ne dépasse pas, en général, 1,5; puis  $t = 1$ , de manière que le terme de correction ne dépasse pas  $\frac{3}{8} (m'' - m')$ , chaque  $m$  n'étant pas plus grand que 0,35.

Donc, si la différence entre  $m$  pour les deux corps actinométriques, par suite de leur non-identité, atteint même 10 pour cent, l'erreur en provenant ne dépasserait pas encore 1 pour cent.

*Exemple numérique.* — Prenons l'exemple de 6. VI. 1905 ( $12^h 48^m_p - 12^h 51^m_p$ ) que nous avons déjà pris au § 10 et § 11. En nous bornant seulement aux observations faites dans les intervalles d'une minute, on a pour la direction I :

$$\Theta_1 = + 2^{\circ}28, \Theta_2 = + 0^{\circ}13, \Theta_3 = - 1^{\circ}58.$$

$$\text{D'où} \quad \omega_I = 0.938; 1 + \varepsilon_I = 1.2564.$$

Quant à  $T_I'$  sa valeur est  $T_I' = 35^{\circ}85 - 30^{\circ}8 = 5^{\circ}05$ , la température de l'air ayant été de  $30^{\circ}8$  et la température du thermomètre gauche de l'actinomètre égale à  $35^{\circ}85$  (voir les données au § 10).

Pour la direction II nous aurons :  $\Theta_1 = - 2^{\circ}00$ ,  $\Theta_2 = - 0^{\circ}05$ ,  $\Theta_3 = + 1^{\circ}62$ . D'où  $\omega_{II} = 0.896$ ,  $1 + \varepsilon_{II} = 1.1650$  et  $T_{II}'' = 35^{\circ}15 - 30^{\circ}8 = 4^{\circ}35$ . En appliquant la formule (106) on a (ayant auparavant trouvé que, d'après (105), la différence  $m'' - m' = 0.007$ ) :

$$\omega = 0.915 \quad \text{et} \quad \frac{1}{2} (\omega_I + \omega_{II}) = 0.917$$

La différence des valeurs relatives est égale à  $- 0.002$ , c'est-à-dire à 0,2 pour cent de la valeur mesurée. Quant aux différences entre  $m$ , elles ne sont pas plus grandes que 0,05 pour cent (ce nombre varie d'ailleurs un peu d'un cas à l'autre

par suite de la difficulté d'effectuer deux mesures, mêmes consécutives, dans des conditions rigoureusement identiques).

B) En examinant l'influence de la non identité, nous nous sommes occupés jusqu'à présent des valeurs relatives  $\omega$  et c'est pourquoi nous nous sommes bornés aux différences dans les coefficients  $h$  et  $m$ . En prenant en considération les valeurs  $q$  de la radiation solaire, il faut supposer que les capacités thermiques  $c$  et les surfaces absorbantes  $s$  ne sont pas rigoureusement identiques pour les deux corps de l'actinomètre. Soit — par suite de ces différences — le coefficient de transmission égal à  $K'$  d'après le premier et à  $K''$  d'après le second thermomètre. On aura dans ce cas

$$q = \frac{1}{2} (q_1 + q_2) - \frac{1}{4} (m'' - m') t. \\ \cdot [K' (1 + \varepsilon_1) T_1' - K'' (1 + \varepsilon_2) T_2''] \quad (107)$$

Cette formule est plus générale que (106) ; les différences entre  $K'$  et  $K''$  ne pouvant être que petites, les limites des erreurs restent sensiblement les mêmes que dans le premier cas.

Remarquons que de grandes différences entre  $c$  et  $s$  pour les deux corps thermométriques pourraient se produire dans le cas où la construction présenterait des défauts plus grands, la condition d'identité étant strictement prescrite et ne présentant pas pour le constructeur des difficultés insurmontables.

C) Enfin, la dernière complication peut provenir de la non-parfaite égalité des pouvoirs absorbants des deux corps actinométriques. Il est utile de nous rappeler que la quantité  $q$  ne correspond pas à l'intensité du rayonnement arrivant à l'actinomètre (désignons ce dernier par  $Q$ ), mais représente plutôt la quantité d'énergie (en gr. cal.) absorbée pendant 1 min. par  $\text{cm}^2$  de la surface noircie de l'appareil exposée

normalement. En désignant par  $a$  le pouvoir absorbant de cette surface, on a

$$Q = \frac{1}{a} q \quad (108)$$

Pour les mesures actinométriques, la connaissance de la valeur de  $a$  n'est pas nécessaire, si le «coefficient de transmission» de l'appareil est déterminé par des comparaisons avec un pyrhéliomètre; il importe seulement que  $a$  soit le même pour les deux corps actinométriques. Si les valeurs de  $a$  sont pour ces deux corps différentes (par exemple  $a'$  et  $a''$ ), on aura d'une manière analogue:

$$Q = \frac{1}{2} (Q_I + Q_{II}) - \frac{1}{4} (m'' - m') t.$$

$$\left[ \frac{K'}{a'} (1 + \varepsilon_I) T_I' - \frac{K''}{a''} (1 + \varepsilon_{II}) T_{II}'' \right] \quad (109)$$

On peut remarquer que la différence notable entre  $a'$  et  $a''$  pourrait plutôt se produire par suite des endommagements ultérieurs de l'une des deux surfaces absorbantes que provenir de la construction de l'appareil. Ajoutons que les surfaces des actinomètres employés à Varsovie étaient noircies par la méthode indiquée par M. Crova (couvertes par un procédé galvanoplastique de noir de platine et ensuite enfumées) et que, pendant la période des observations, elles n'ont pas subi aucun changement visible.

§ 17. *Sur les erreurs provenant de l'influence inégale des sources secondaires de la chaleur sur chacun des deux corps actinométriques.*

Les thermomètres actinométriques soumis à l'action directe des rayons solaires peuvent encore subir et subissent en réalité l'action des diverses sources secondaires de la chaleur.

Ce sont par exemple les rayons réfléchis, soit par la surface terrestre, soit par les couches atmosphériques, qui retournent dans la direction de la bande absorbante de l'appareil ; une importance particulière doit être attribuée ici aux réflexions produites par les objets environnants, réflexions variables suivant l'orientation de l'appareil par rapport à eux.

Supposons que, outre la radiation directe, il existe une certaine source secondaire sous l'influence de laquelle les thermomètres actinométriques donnent une certaine différence  $\delta$  des températures, indépendante de celle qui est due au rayonnement solaire direct. La valeur de  $\delta$  dépend en général de la position du soleil dans une journée donnée, de la saison de l'année et de beaucoup d'autres circonstances, mais pendant quelques minutes elle peut être considérée comme sensiblement constante

Par suite de cette différence supplémentaire  $\delta$ , on obtient (par exemple dans la direction I) au lieu de la valeur vraie  $\omega_1$

$$\omega_1 = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (110)$$

la valeur suivante

$$\begin{aligned} \omega_1' &= \frac{(\Theta_2 + \delta)^2 - (\Theta_1 + \delta)(\Theta_3 + \delta)}{(\Theta_1 + \delta) - (\Theta_3 + \delta)} = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} - \\ &- \delta \frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} = \omega_1 - \frac{m_1 t}{2} \delta \end{aligned} \quad (111)$$

en remarquant que le facteur  $\frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3}$ , discuté déjà à

plusieurs reprises, représente une quantité caractéristique pour la mesure [voir la formule (29)].

Pour la mesure suivante, dans la direction II, il faut changer  $\delta$  en  $-\delta$  ; nous obtiendrons deux formules

$$\begin{cases} \omega_I' = \omega_I - \frac{1}{2} m_I t \delta \\ \omega_{II}' = \omega_{II} + \frac{1}{2} m_{II} t \delta \end{cases} \quad (112)$$

dont nous tirons les résultats suivants :

1) Dans le cas d'influence inégale des sources secondaires, on obtient une compensation des erreurs qui en proviennent, en prenant la moyenne des deux mesures consécutives dans les directions opposées.

2) L'erreur qui reste encore et qui est donnée par le dernier terme de la formule

$$\omega = \frac{1}{2} (\omega_I + \omega_{II}) = \frac{1}{2} (\omega_I' + \omega_{II}') + \frac{1}{4} t \delta (m_I - m_{II}) \quad (113)$$

ne peut pas être trop grande ; en effet, en substituant dans (113) des valeurs considérables  $\delta = \pm 0^{\circ}4$ ,  $m_I - m_{II} = 0.1$  (ce qui représente ca. 30 pour cent de changements dans  $\dot{m}$  pour les deux mesures consécutives), on obtient pour le terme de correction le nombre  $\pm 0.01$ . Les valeurs relatives  $\omega$  étant, en général, plus grandes que 1, il ne peut pas en résulter une erreur atteignant 1 pour cent.

*Exemple.* — La mesure ci-dessous fut effectuée à Varsovie le 12. V. 1901 dans des conditions, dans lesquelles l'influence des sources secondaires était assez accentuée ( $\delta = -0^{\circ}20$ ). Quant à la détermination de  $\delta$ , on a employé le procédé suivant : les deux thermomètres actinométriques étaient préalablement et simultanément ombragés (par la mise dans la position verticale des deux écrans, y attachés) et laissés quelque temps jusqu'au moment d'équilibre ; puis, les écrans étant rapidement abaissés, on faisait des lectures simultanées des

deux thermomètres (dirigés toujours normalement vers le soleil) dans des intervalles de 30 secondes.

Après cinq lectures, les thermomètres étaient de nouveau ombragés et l'on observait des diminutions de leurs températures dans les mêmes intervalles etc. De cette façon, on a déduit la valeur moyenne de cette différence  $\delta$ , qu'indiquent caeteris paribus les deux thermomètres.

Direction II. 8<sup>h</sup>20<sup>m</sup>a.  $\Theta_1 = -3^{\circ}40$ ,  $\Theta_2 = +0^{\circ}13$ ,  $\Theta_3 = +2^{\circ}63$ . D'où  $\omega'_{II} = 1.486$ ,  $m_{II} = 0.342$ . Donc  $\omega'_{II} - \omega_{II} = -0.034$  et  $\omega_{II} = 1.452$ .

Direction I. 8<sup>h</sup>24<sup>m</sup>a.  $\Theta_1 = +3^{\circ}25$ ,  $\Theta_2 = -0^{\circ}01$ ,  $\Theta_3 = -2^{\circ}46$ . D'où  $\omega'_I = 1.400$ ,  $m_I = 0.270$ . Donc  $\omega'_I - \omega_I = 0.027$  et  $\omega_I = 1.427$ .

En formant les moyennes on obtient  $\omega = \frac{1}{2}(\omega_I + \omega_{II}) = 1.440$ , tandis que  $\frac{1}{2}(\omega'_I + \omega'_{II}) = 1.443$ . La différence est égale à  $-0.003$ , c'est-à-dire à 0,2 pour cent de la valeur mesurée.

#### § 18. Sur les erreurs dépendant des corrections des thermomètres actinométriques.

Si, pour calculer les différences  $\Theta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), on a négligé les corrections des thermomètres ou bien si leurs valeurs n'ont pas été tout à fait exactes, les différences consécutives  $\Theta'_i$  seront un peu changées par rapport aux  $\Theta_i$  vrais; on peut poser notamment

$$\Theta'_1 = \Theta_1 + \delta_1, \quad \Theta'_2 = \Theta_2 + \delta_2, \quad \Theta'_3 = \Theta_3 + \delta_3 \quad (114)$$

où  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  et  $\delta_3$  représentent de petits écarts, positifs ou négatifs. C'est un cas analogue au cas discuté au § 17 avec cette différence cependant que la valeur de  $\delta$  y était considérée comme constante pendant le temps donné, tandis qu'ici tous les

$\delta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) peuvent n'être pas les mêmes. Mais, les corrections des thermomètres actinométriques ne présentant que de petites variations dans les limites de trois ou quatre degrés de l'échelle, on peut considérer la valeur de  $\delta$  dans chaque mesure comme sensiblement constante et admettre que les résultats obtenus au § 17, sont aussi valables pour le cas actuel. D'ailleurs, la déduction des formules spéciales avec  $\delta_i$ , lesquelles auraient seulement confirmé cette conclusion, ne présente aucune difficulté.

Dans les mesures faites à Varsovie, on a corrigé les lectures des thermomètres en y introduisant les corrections, dont nous avons parlé au § 9 ; c'est pourquoi, cette source d'erreurs peut être négligée ici. Restent seulement les erreurs dues aux changements éventuels, avec le temps, des valeurs des corrections, mais l'erreur en provenant peut être certainement négligée pour les moyennes des deux mesures effectuées dans les directions opposées.

---

## CHAPITRE QUATRIÈME

Sur les erreurs d'observation et sur les erreurs accidentelles des valeurs relatives du rayonnement, d'après les mesures actinométriques de Varsovie.

§ 19. *Sur les erreurs d'observation dues à la non-égalité des intervalles de temps.*

En déduisant du système des équations

$$\begin{cases} \Theta_2 = \Theta_1 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \\ \Theta_3 = \Theta_2 e^{-mt} - T_1 (1 - e^{-mt}) \end{cases} \quad (115)$$

notre formule pour les valeurs relatives de l'actinomètre

$$\omega = \frac{1}{t} \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (116)$$

nous avons supposé que les intervalles de temps dans lesquels on observe les différences  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$  étaient égaux entre eux. Si cette condition n'est pas rigoureusement remplie, la valeur calculée de  $\omega$  s'obtient avec une certaine erreur qui va nous occuper dans ce qui suit.

Considérons deux cas. Admettons d'abord que tous les intervalles  $t$  sont pris avec une même erreur  $\Delta t$ . La différenciation de la formule (116) nous donne

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = - \frac{\Delta t}{t} \quad (117)$$

d'où cette conclusion que les erreurs pour cent dans  $t$  et  $\omega$  sont égales, mais de signes contraires. Ce résultat est d'ailleurs évident d'après la forme seule de (116).

Dans les mesures faites avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson les lectures des thermomètres s'effectuent dans les intervalles de trente secondes. Supposant que l'erreur commise soit égale à 1 seconde ( $\Delta t = \frac{1}{60}$  min.) l'erreur correspondante dans la détermination de  $\omega$  ( $t = 1$  min.) s'élèvera à 1,7 pour cent. Pour les  $\Theta$  pris d'après les intervalles  $t = 0,5$  min. ces limites seront encore doublées.

Dans le second cas, plus général et plus fréquent au point de vue de la pratique des mesures, nous supposons que les intervalles entre la lecture des différences  $\Theta_1$  et  $\Theta_2$  ainsi qu'entre  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$  ne sont pas égaux entre eux.

Dans ce cas, il faut admettre que la différence  $\Theta_3$  dans la formule (116) représente aussi une fonction de  $t$ ; la différenciation nous donne donc

$$\Delta \omega = - \frac{1}{t^2} \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \Delta t - \frac{1}{t} \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \Delta \Theta_3 \quad (118)$$

ce qui peut être présenté sous la forme

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = - \frac{\Delta t}{t} - \frac{\Delta \Theta_3}{\omega} \frac{1}{t} \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \quad (119)$$

Il est facile de démontrer que le dernier membre de la formule (119) est toujours de signe contraire par rapport au membre précédent; par conséquent, l'erreur  $\frac{\Delta \omega}{\omega}$  sera dans notre cas actuel caeteris paribus plus petite que dans le premier cas [voir formule (117)].

En effet, la différenciation de la seconde formule du système (115) nous donne immédiatement

$$\Delta \Theta_3 = - m e^{-mt} (T_1 + \Theta_2) \Delta t \quad (120)$$

Les facteurs  $m$ ,  $t$  et  $e^{-mt}$  restent toujours positifs; de même, est positive la somme  $T_1 + \Theta_2$ ,  $T_1$  étant toujours positif et plus grand que  $\Theta_2$ .

On a donc

$$\frac{\Delta \Theta_3}{\Delta t} = (T_1 + \Theta_2) \frac{\Delta e^{-mt}}{\Delta t} < 0 \quad (121)$$

ce qui justifie la conclusion énoncée plus haut.

Nous avons, par conséquent, dans le second cas

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} < - \frac{\Delta t}{t} \quad (122)$$

En faisant donc, dans ces conditions, l'erreur de 1 sec. ( $\Delta t = 0.017$  min.), on obtient une différence dans la détermination de  $\omega$ , laquelle est plus petite que 1,7 pour cent, si les différences sont prises d'après les intervalles de 60 sec.

Prenons quelques exemples numériques.

1) Soit  $\Theta_1 = 2^{\circ}00$ ,  $\Theta_2 = - 0^{\circ}02$ ,  $\Theta_3 = 1^{\circ}76$  et supposons que la lecture  $\Theta_2$  a été faite dans l'intervalle  $t = 1$  min., mais que la lecture finale  $\Theta_3$  était retardée d'une seconde ( $t' = 1.017$  min.). On a donc  $\Delta t = + 0.017$ .

Les différences admises  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  donnant en conséquence  $m = 0.15$  et  $T_1 = 12.5$ , on obtient, d'après la formule (120),  $\Delta \Theta_3 = - 0.0197$ . La formule (119) nous donnera donc  $\frac{\Delta \omega}{\omega} = - 0.017 + 0.006 = - 0.011$ ; pour  $\omega$ , on trouve, d'après (116),  $\omega = 0.936$ .

Conformément à nos résultats théoriques, nous voyons que les deux facteurs pour  $\frac{\Delta \omega}{\omega}$  ont des signes contraires et que

l'erreur pour cent dans  $\omega$  (1,1 pour cent) est plus petite que dans le premier cas, pour le même  $\Delta t$ .

2) Soit  $\Theta_1 = 3^{\circ}20$ ,  $\Theta_2 = -0^{\circ}22$ ,  $\Theta_3 = -2^{\circ}55$ . L'intervalle entre  $\Theta_1$  et  $\Theta_2$  est égal à 1 min., mais la lecture finale est effectuée trop tôt d'une seconde. Nous avons donc  $\Delta t = -0.017$ .

Ainsi, comme dans l'exemple précédent, nous calculons tout d'abord  $m$  et  $T_1$ . On obtient  $e^{-mt} = \frac{\Theta_2 - \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_2} = 0.741$ , d'où  $m = 0.30$  ( $t = 1$ ). Puis  $T_1 = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3} = 10.0$  et, d'après (120),  $\Delta \Theta_3 = +0.037$ . Enfin  $\omega = 1.489$ . En substituant ces données aux termes de la formule (119), on obtient  $\frac{\Delta \omega}{\omega} = +0.017 - 0.007 = +0.010$ , c'est-à-dire l'erreur est égale à 1 pour cent de la valeur mesurée.

3) Pour  $\omega$ , calculé d'après les intervalles d'une demi-minute, les erreurs en question auront une influence respectivement plus grande. Prenons l'exemple suivant :

$$\Theta_1 = \theta_1 = -1^{\circ}58, \Theta_2 = \theta_2 = +0^{\circ}09, \Theta_3 = \theta_3 = +1^{\circ}32.$$

Soit  $t = 0,5$  min. et supposons que la lecture finale est en retard d'une seconde ( $\Delta t = +0.017$ ). On trouve consécutivement, d'après les différences données :  $e^{-mt} = 0.74$ ,  $mt = 0.30$ ,  $T_1 = 5.1$ . D'où  $\Delta \Theta_3 = -0.0196$  ; enfin  $\omega = 2 \frac{\theta_2^2 - \theta_1 \theta_3}{\theta_1 - \theta_3} = 1.444$ .

La formule (119) nous donne :  $\frac{\Delta \omega}{\omega} = -0.034 + 0.008 = -0.026$ , c'est-à-dire 2.6 pour cent de la valeur mesurée.

De tous ces exemples et discussions il résulte que les erreurs dues à la non-égalité des intervalles de temps ne

représentent pas, en général, des quantités négligeables ; ce fait mérite d'autant plus d'attention que dans l'ancienne théorie de l'actinomètre la source des erreurs en question a été négligée.

Il est également établi dans le présent paragraphe que la même erreur dans le temps donne des écarts plus grands pour les intervalles de demi-minute que pour ceux d'une minute ; c'est probablement la cause principale des différences qu'on observe, dans la pratique, dans les deux valeurs de  $\omega$ , déduites d'après une mesure.

Par suite du caractère accidentel de cette source d'erreurs on peut tâcher de réduire considérablement leur influence, en formant les moyennes d'après quelques mesures consécutives. Nous verrons plus loin de quelle manière on a procédé pour former les moyennes de  $\omega$ .

#### § 20. *Sur les erreurs des lectures thermométriques.*

Les thermomètres actinométriques ont les traits de division de 0°05 à 0°05, mais, grâce à une grande loupe convenablement placée, les lectures peuvent facilement être effectuées jusqu'à 0°01. On peut donc admettre 0°02 comme erreur accidentelle dans l'évaluation des différences des températures. Il s'agit de savoir quelle est l'influence de ces erreurs des lectures sur la valeur relative de  $\omega$ , calculée d'après la formule

$$\omega = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \quad (123)$$

Distinguons les cas suivants :

A) Supposons que la différence  $\Theta_1$  est déterminée avec une erreur  $\Delta \Theta_1$ , tandis que les valeurs de  $\Theta_2$  et  $\Theta_3$  sont évaluées d'une manière exacte.

La différenciation de (123) nous donne

$$\Delta \omega = \frac{\Theta_3^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \Delta \Theta_1 \quad (124)$$

M. Chwolson (l. c.) remplace cette équation par l'inégalité

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} < \frac{\omega}{\Theta_1} \cdot \frac{\Delta \Theta_1}{\Theta_1} \quad (125)$$

La différence  $\Theta_1$  oscillant, en général, entre  $2^\circ$  et  $3^\circ$ , l'erreur de  $0^\circ 02$  dans la détermination de  $\Theta_1$  ne peut entraîner une différence dans la valeur relative de  $\omega$  dépassant 0,5 pour cent.

*Exemple.*  $\Theta_1 = + 3^\circ 12$ ,  $\Theta_2 = + 0^\circ 01$ ,  $\Theta_3 = - 2^\circ 10$ . D'où  $\omega = 1.255$ . Pour  $\Delta \Theta_1 = + 0^\circ 02$ , on aura  $\Theta'_1 = + 3^\circ 14$ ; donc  $\omega' = 1.258$ . La différence  $\Delta \omega = 0.003$  correspond à 0,2 pour cent de la valeur mesurée.

B) Soit la lecture de  $\Theta_2$  obtenue avec une erreur  $\Delta \Theta_2$ , tandis que  $\Theta_1$  et  $\Theta_3$  sont justes. D'après (123)

$$\Delta \omega = \frac{2 \Theta_2}{\Theta_1 - \Theta_3} \cdot \Delta \Theta_2 \quad (126)$$

d'où l'on obtient facilement

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} < 2 \frac{\Theta_2}{-\Theta_1 \Theta_3} \cdot \Delta \Theta_2 \quad (127)$$

Dans la méthode des mesures, appliquée à Varsovie,  $\Theta_2$  étant toujours une petite fraction ( $< 0^\circ 5$ ) de degré et le produit  $-\Theta_1 \Theta_3$  dépassant, en général, le nombre 5, il résulte de l'inégalité (127) que l'erreur  $0^\circ 02$  dans la détermination de  $\Theta_2$  n'entraîne pas, même dans les conditions peu favorables, une différence de 0,4 pour cent dans la valeur mesurée.

*Exemple.* Soit  $\Theta_1 = - 2^\circ 74$ ,  $\Theta_2 = + 0^\circ 37$ ,  $\Theta_3 = + 1^\circ 83$ . Donc  $\omega = 1.127$ . Pour  $\Delta \Theta_2 = + 0^\circ 02$  on a  $\Theta'_2 = + 0.39$ ,

d'où  $\omega' = 1.130$ . La différence  $\Delta \omega = 0.003$  correspond à ca. 0,3 pour cent de la valeur de  $\omega$ .

C) Quand l'erreur se rapporte seulement à  $\Theta_3$ , on peut conclure de la formule (123)

$$\Delta \omega = - \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \Delta \Theta_3 \quad (128)$$

et de l'inégalité qui s'ensuit

$$- \frac{\Delta \omega}{\omega} < \frac{\omega}{\Theta_3} \cdot \frac{\Delta \Theta_3}{\Theta_3} \quad (129)$$

que  $\Delta \Theta_3$  produit, dans la détermination de  $\omega$ , une influence contraire à celle de  $\Delta \Theta_1$ . Les limites des erreurs sont ici plus grandes, dans la proportion de  $\Theta_1$  à  $-\Theta_3$ , que dans le cas de  $\Theta_1$ ; dans les conditions habituelles, elles ne doivent pas dépasser 0,8 pour cent.

*Exemple.*  $\Theta_1 = + 2^{\circ}92$ ,  $\Theta_2 = - 0^{\circ}05$ ,  $\Theta_3 = - 2^{\circ}24$ . D'où  $\omega = 1.268$ . En prenant  $\Delta \Theta_3 = + 0^{\circ}02$ , on obtient  $\Theta_3' = - 2^{\circ}22$  et donc  $\omega' = 1.262$ .

La différence  $\Delta \omega = - 0.006$  correspond à 0,5 pour cent et a un signe différent par rapport au cas A).

D) Dans le cas général, quand toutes les différences sont évaluées avec quelques erreurs de lecture  $\Delta \Theta_1$ ,  $\Delta \Theta_2$  et  $\Delta \Theta_3$ , on a pour l'erreur totale dans la valeur de  $\omega$

$$\Delta \omega = \frac{\Theta_3^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \Delta \Theta_1 + \frac{2 \Theta_2}{\Theta_1 - \Theta_3} \Delta \Theta_2 - \frac{\Theta_1^2 - \Theta_2^2}{(\Theta_1 - \Theta_3)^2} \Delta \Theta_3 \quad (130)$$

Il s'ensuit que dans le cas (le plus fréquent dans la pratique) où les signes de  $\Delta \Theta_1$ ,  $\Delta \Theta_2$  et  $\Delta \Theta_3$  sont les mêmes, c'est-à-dire quand toutes les lectures sont faites avec des écarts dans le même sens, le premier et le troisième terme de la partie

droite de l'équation (130) ont des signes contraires : on obtient donc une certaine compensation.

Si, en outre, toutes les lectures sont effectuées avec la même erreur, c'est-à-dire quand

$$\Delta \Theta_1 = \Delta \Theta_2 = \Delta \Theta_3 = \Delta \Theta \quad (131)$$

on a

$$\Delta \omega = - \frac{\Theta_1 - 2\Theta_2 + \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3} \Delta \Theta = - \frac{mt}{2} \Delta \Theta \quad (132)$$

On sait, d'après les paragraphes précédents, que  $m < 0,35$  et que  $t$  est égal à 0,5 ou à 1. Nous en concluons que

$$\Delta \omega < - 0,2 \cdot \Delta \Theta \quad (133)$$

Pour  $\Delta \Theta = \pm 0^{\circ}02$ , l'erreur qui en résulte dans la détermination de  $\omega$  ne dépassera 0,4 pour cent, les valeurs actinométriques relatives étant, en général, plus grandes que 1.

*Exemple.*  $\Theta_1 = + 2^{\circ}92$ ,  $\Theta_2 = - 0^{\circ}05$ ,  $\Theta_3 = - 2^{\circ}24$ . D'où  $\omega = 1.268$ . En prenant  $\Delta \Theta_1 = \Delta \Theta_2 = \Delta \Theta_3 = \Delta \Theta = + 0^{\circ}02$ , on a :  $\Theta_1' = + 2^{\circ}94$ ,  $\Theta_2' = - 0^{\circ}03$ ,  $\Theta_3' = - 2^{\circ}22$ . Donc  $\omega' = 1.265$  et la différence  $\Delta \omega = - 0.003$  correspond à 0,2 pour cent de la valeur mesurée et possède un signe contraire à celui de  $\Delta \Theta$ .

## § 21. Résultats généraux de la théorie des erreurs.

Dans les §§ 12-20, nous avons examiné les différentes sources d'erreurs dans les mesures avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson. Pour en faciliter l'aperçu général nous groupons ensemble les résultats obtenus.

1) Erreurs dues à l'application de la loi de Newton.

Elles sont négligeables dans les conditions des mesures actinométriques de Varsovie, pour les valeurs calculées de la radiation.

2) Erreurs provenant des changements de la valeur de  $h$  pendant une mesure.

Ces erreurs dépendant de la plus ou moins grande vitesse du vent dans le voisinage immédiat de l'appareil, peuvent occasionner des différences plus considérables (au-dessus de 1 pour cent) dans les résultats, lorsque l'actinomètre subit des coups de vent.

L'actinomètre doit être protégé contre l'influence des changements trop brusques de la vitesse du vent ce qui n'offre pas, en général, des difficultés pratiques trop considérables.

3) Erreurs dues à la non-égalité du coefficient  $h$  pour les deux corps, par suite des différences de leurs températures.

La limite probable des erreurs qui en résultent ne doit pas dépasser 0,2 pour cent, dans les conditions des mesures actinométriques de Varsovie.

4) Erreurs provenant des changements de la valeur de la radiation solaire pendant une mesure.

Dans le cas où l'intensité du rayonnement solaire augmente resp. diminue durant une mesure, l'actinomètre donne des valeurs relatives, inférieures resp. supérieures à la moyenne, calculée pour le même temps.

Il existe une certaine asymétrie des erreurs dans ce sens que les écarts positifs, dans les cas de diminution, sont toujours plus grands.

5) Erreurs dues à la non-parfaite identité des deux corps actinométriques.

Si la valeur de  $h$ , par suite d'une différence de construction des deux corps actinométriques, présentait une différence de 10 pour cent pour l'un de ces corps par rapport à l'autre, l'erreur en provenant ne dépasserait pas encore 1 pour cent de la valeur mesurée.

Les exemples pris d'après les mesures de Varsovie montrent le peu d'importance de cette source d'erreurs.

6) Erreurs provenant de l'influence inégale des sources secondaires de la chaleur sur chacun des deux corps actinométriques.

La formation des moyennes des mesures, effectuées dans les directions opposées (I et II), introduit une compensation de l'influence des sources secondaires de la chaleur; l'erreur qui en reste ne doit que rarement dépasser 1 pour cent et elle a un caractère accidentel.

7) Erreurs dépendant des corrections des thermomètres actinométriques.

Elles donnent des écarts très petits qui d'ailleurs se compensent dans les moyennes des mesures effectuées dans les directions opposées.

8) Erreurs dues à la non-égalité des intervalles du temps.

Dans le cas où tous les intervalles de temps subissent une augmentation ou une diminution, les erreurs pour cent qui en résultent dans les valeurs relatives de l'intensité, sont égales à celles du temps, mais elles ont des signes contraires.

Quand l'augmentation ou la diminution se rapporte à un seul intervalle, l'erreur diminue ; en général, elle ne dépasse pas 1 pour cent pour les différences de 1 sec., si l'on calcule la valeur relative d'après les différences prises dans l'intervalle de 1 min. Pour les différences obtenues d'après les intervalles de 30 secondes, les limites se doublent.

Le trait caractéristique de cette source consiste en ce que son influence sur les deux valeurs de  $\omega$ , déduites de chaque mesure, est inégale.

9) Erreurs des lectures thermométriques,

L'erreur dans la détermination des premières différences ne doit pas influencer la valeur relative de l'intensité plus que pour 0,5 pour cent, l'erreur dans les secondes différences plus que 0,4 pour cent et dans les troisièmes plus que 0,8 pour cent.

Cette dernière erreur a cependant un signe contraire à la première et à la seconde, de manière que de la combinaison de toutes les trois erreurs résulte une certaine compensation.

Ainsi, si toutes les différences sont déterminées avec une même erreur individuelle, l'erreur qui en résulte dans  $\omega$ , ne doit pas dépasser 0,4 pour cent.

Par suite de son caractère accidentel les erreurs mentionnées sub 8) et 9) peuvent être considérablement réduites, en prenant les moyennes de quelques mesures consécutives.

Les résultats généraux de la théorie des erreurs peuvent être résumés de la manière suivante. En supposant que les conditions :

A) Pour que l'actinomètre soit convenablement protégé contre l'action de forts et brusques changements de la vitesse du vent dans son voisinage immédiat ;

B) Pour que les mesures soient seulement effectuées, quand le soleil est suffisamment dégagé des voiles et des nuages ;

C) Pour que chaque valeur particulière  $\omega$  de l'intensité relative du rayonnement soit obtenue comme moyenne des deux mesures effectuées dans les directions opposées ;

en supposant que toutes ces conditions soient remplies, on peut admettre que les erreurs accidentelles ne doivent pas dépasser trois pour cent environ pour une valeur particulière de  $\omega$ . Il s'agit ici, bien entendu, des valeurs relatives de l'intensité du rayonnement ; les erreurs dans les valeurs définitives de la radiation solaire en gr. cal. seront discutées dans le chapitre VI, après les comparaisons pyrhéliométriques.

L'influence de toutes les erreurs accidentelles peut cependant subir une réduction considérable, en prenant, comme valeurs définitives, les moyennes de quelques mesures consécutives. Nous nous occuperons de cette question dans le paragraphe suivant.

§ 22. *Méthode de formation des valeurs définitives de  $\omega$ .*

Pour éviter une accumulation plus grande des erreurs accidentelles des mesures, surtout quand les conditions atmosphériques sont moins favorables, il est important et utile de former les moyennes. Pour que la période de temps ne soit pas trop longue, il est convenu, dans les mesures de Varsovie, de faire successivement 6 mesures (composées de 30 lectures doubles des thermomètres) ce qui donne 12 valeurs de  $\omega$ . Des deux valeurs :  $\omega_1$  et  $\omega_2$  pour chaque mesure, on forme 6 moyennes, d'où on obtient 5 valeurs particulières de  $\omega$  [voir condition c) au § 21] et de ces dernières une valeur relative définitive de l'intensité du rayonnement.

A quelques exceptions près, ce sont seulement les valeurs « définitives » qui ont été utilisées dans les discussions des variations annuelles.

Pour mieux comprendre cette méthode de formation des moyennes, citons un exemple d'une pareille série.

Varsovie. 29. VI. Actinomètre NN. 44, 29.

Table I. — *Exemple d'une série de mesures actinométriques.*

| Numéro<br>d'ordre | Direction | Temps<br>moyen<br>local        | $\omega_1$ $\omega_2$ |            | $\omega_I$ | $\omega_{II}$ | $\omega$<br>«par-<br>ticulier» | $(\omega)$<br>«définitif» |
|-------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|---------------------------|
|                   |           |                                | $\omega_1$            | $\omega_2$ |            |               |                                |                           |
| 1                 | I         | 9 <sup>h</sup> 8 <sup>m</sup>  | 1.25                  | 1.22       | 1.24       | —             | —                              | 1.241                     |
| 2                 | II        | 12 <sup>m</sup>                | 1.20                  | 1.28       | —          | 1.24          | 1.24                           |                           |
| 3                 | I         | 16 <sup>m</sup>                | 1.21                  | 1.22       | 1.22       | —             | 1.23                           |                           |
| 4                 | II        | 19 <sup>m</sup>                | 1.28                  | 1.22       | —          | 1.25          | 1.24                           |                           |
| 5                 | I         | 22 <sup>m</sup>                | 1.25                  | 1.24       | 1.25       | —             | 1.25                           |                           |
| 6                 | II        | 9 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> | 1.28                  | 1.28       | —          | 1.25          | 1.25                           |                           |

Il faut remarquer que les valeurs

$$\omega_1 = \frac{\Theta_2^2 - \Theta_1 \Theta_3}{\Theta_1 - \Theta_3}, \quad \omega_2 = 2 \frac{\theta_2^2 - \theta_1 \theta_3}{\theta_1 - \theta_3},$$

$$\omega_I, \omega_{II} \text{ et } \omega = \frac{1}{2} (\omega_I + \omega_{II})$$

ont été calculées d'après les schémas exposés au § 10. La valeur définitive ( $\omega$ ) était prise, comme moyenne de cinq  $\omega$  particuliers, non d'après la méthode des moyennes arithmétiques, mais en combinant en une seule les valeurs première et cinquième et en divisant la somme par 4. On employait donc la formule de réduction

$$(\omega) = \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_5) + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 \right] \quad (134)$$

en rapportant la valeur définitive de  $\omega$ , ainsi obtenue, au temps correspondant.

Pour le calcul des valeurs relatives, on s'est toujours borné à deux chiffres décimaux, excepté pour les valeurs « définitives ».

L'exemple cité plus haut, pris au hasard, correspond aux conditions ordinaires. Nous voyons par là que les oscillations entre les deux valeurs  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , déduites d'après une mesure, sont relativement assez considérables. Les causes principales de ces oscillations sont au nombre de trois : les erreurs dans les lectures thermométriques et surtout dans l'évaluation des intervalles du temps, puis les influences des sources secondaires de la chaleur et les changements dans la valeur mesurée de la radiation solaire. Nous voyons donc que la formation des valeurs moyennes « définitives » d'après quelques mesures est pleinement justifiée et paraît même nécessaire.

§ 23. *Sur les erreurs accidentelles probables des valeurs relatives de la radiation, d'après les mesures actinométriques de Varsovie.*

Dans le paragraphe précédent, il a été énoncé que l'erreur accidentelle d'une valeur particulière de  $\omega$  peut atteindre jusqu'à trois pour cent environ. Il serait intéressant de savoir quelles sont les erreurs accidentelles probables pour les diverses séries des mesures, effectuées à Varsovie pendant la période 1901-1905. Il est bien entendu que, en appliquant la méthode des moindres carrés pour les écarts des valeurs particulières de  $\omega$  par rapport à leurs valeurs définitives ( $\omega$ ), on suppose toujours que tous les écarts ont un caractère purement accidentel.

Nous ne citerons que les résultats de quelques jours, où les conditions atmosphériques étaient habituelles, c'est-à-dire le ciel était en partie couvert de nuages et la transparence n'était pas parfaite ; seulement des quatre derniers exemples, les deux premiers ont été obtenus dans des conditions bonnes et les deux derniers dans des conditions plutôt défavorables.

( Voir Table II, p. 72 )

Dans cette table, les nombres qui figurent dans la colonne ( $\omega$ ) désignent les valeurs relatives définitives, dont nous avons parlé au § 22, c'est-à-dire les moyennes formées de cinq  $\omega$  particuliers, d'après la formule de réduction

$$(\omega) = \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{2} (\omega_2 + \omega_5) + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 \right] \quad (134 \text{ bis})$$

ce qui correspond à une moyenne arithmétique de quatre mesures.

Table II. — *Erreurs accidentelles probables des valeurs « particulières » relatives de  $\omega$ , d'après les mesures actinométriques de Varsovie.*

| DATE          | Temps<br>moyen<br>local           | ( $\omega$ ) | $f$   | $100. \frac{f}{(\omega)}$ | REMARQUES               |
|---------------|-----------------------------------|--------------|-------|---------------------------|-------------------------|
|               |                                   |              |       | o/o                       |                         |
| 8. IV. 1901   | 11 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup> a | 1.675        | 0.007 | 0.4                       | Voiles légers           |
| 9. V. »       | 9 <sup>h</sup> 23 <sup>m</sup> a  | 1.543        | 11    | 0.7                       |                         |
| 16. VII 1902  | 1 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> p  | 1.346        | 12    | 0.9                       |                         |
| 27. VIII. »   | 11 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> a | 1.116        | 08    | 0.7                       |                         |
| 14. I. 1903   | 11 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup> a | 0.898        | 06    | 0.7                       |                         |
| 7. II. »      | 11 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> a | 0.833        | 06    | 0.7                       |                         |
| 4. III. 1904  | 12 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> p | 1.347        | 06    | 0.5                       |                         |
| 6. III. »     | 11 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> a | 1.313        | 07    | 0.6                       |                         |
| 16. V. 1905   | 1 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> p  | 1.317        | 09    | 0.7                       |                         |
| 20. IX. »     | 9 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> a  | 1.343        | 10    | 0.8                       |                         |
| 17. III. 1904 | 11 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup> a | 1.289        | 01    | 0.1                       | Ciel pur                |
| 5. X. 1902    | 9 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> a  | 1.119        | 02    | 0.2                       | Nébul. 0                |
| 10. V. 1901   | 8 <sup>h</sup> 33 <sup>m</sup> a  | 1.356        | 27    | 2.0                       | Passage de nuages       |
| 23. III. 1903 | 11 <sup>h</sup> 38 <sup>m</sup> a | 1.184        | 0.016 | 1.4                       | Voiles autour du soleil |

Puis,  $f$  exprime l'erreur accidentelle probable de chaque valeur particulière entrant dans la formation de la moyenne arithmétique ; cet  $f$  se calcule d'après la formule connue

$$f = + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-1}} \quad (135)$$

où  $\delta$  désigne les écarts et où à  $n$  il faut substituer, dans notre cas, le nombre 4.

Dans les dernières colonnes, les erreurs des valeurs particulières de  $\omega$  sont exprimées en pour cent ; des nombres qui s'y

trouvent, il résulte que les erreurs, dans les conditions atmosphériques habituelles, ne dépassent pas, en général, 1 pour cent. Les mêmes erreurs pour les valeurs définitives seront encore plus petites, dans le rapport de  $1 : \sqrt{n}$ , c'est-à-dire  $1 : 2$ .

Nous voyons donc que, en prenant pour les discussions ultérieures les valeurs définitives ( $\omega$ ), on peut admettre que les erreurs accidentelles des mesures actinométriques relatives ne dépassent pas à Varsovie, en général, 0,5 pour cent.

— — — — —

## CHAPITRE CINQUIÈME

Sur les indications des pyréliomètres électriques de compensation, employés à Varsovie.

### § 24. *Littérature de l'appareil.*

On peut trouver les descriptions et examens du pyréliomètre de compensation dans les mémoires suivants que nous citons dans l'ordre chronologique :

a) Knut Ångström. Eine elektrische Kompensationsmethode zur quantitativen Bestimmung strahlender Wärme- [Nova Acta r. Societatis Scient. Upsalensis ; ser. III, vol. XVI, 1893 ; voir aussi The physical Review I, 365. 1893].

Ueber absolute Bestimmungen der Wärmestrahlung mit dem elektrischen Compensations-pyrheliometer, nebst einigen Beispielen der Anwendung dieses Instrumentes. [Ann. d. Phys. Bd. LXVII, 1899 ; voir aussi Astrophys. Journal, vol. IX. 1899].

Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes. [Nova Acta r. Soc. Sc. Upsalensis, 1900].

b) C. F. Marvin. The measurement of Sunshine and the preliminary examination of Ångström's Pyrheliometer. [Monthly Weather Review ; vol. XXIX. 1901].

c) J. Westman. Mesures de l'intensité de la radiation

solaire faites en 1899 et en 1900 à la baie de Treurenberg, Spitzberg. (Stockholm, 1903).

*d)* Harvey N. Davis. Observations of solar radiation with the Ångström pyrheliometer at Providence R. J. [Month. W. Review ; N. 6, pp. 275-280 ; 1903].

*e)* H. H. Kimball. Observations of solar radiation with the Ångström pyrheliometer at Asheville and Black Mountain, N. C. [Mont. W. Review ; N. 7, pp. 320-334 ; 1903].

*f)* Ragnar Holm. Mesures pyrhéliométriques à Hald (effectuées ensemble avec M. Jansson). [«Travaux de la station franco-scandinave», 1904].

*g)* Ciro Chistoni. Sul pireliometro a compensazione elettrica dell' Ångström. [Rendiconti della R. Accademia dei Lincei ; vol. XIV, ser. 5<sup>a</sup> ; Roma, 1905].

Ajoutons que dans les publications de M. Ångström citées ci-dessus, se trouve la description complète de la construction de l'appareil, ainsi que l'examen des constantes ; des descriptions analogues se trouvent aussi dans les autres mémoires avec quelques remarques supplémentaires sur le fonctionnement de l'appareil et sur la méthode des mesures pour les observations courantes. En particulier, MM. Marvin, Davis, Kimball et Chistoni s'occupaient des comparaisons de divers exemplaires de pyrhéliomètres. D'autre part, M. Westman s'occupait de l'examen minutieux des indications des miliampère-mètres qui ont une importance capitale pour les mesures par cette méthode électrique de compensation.

## § 25. *Formules fondamentales.*

Les descriptions détaillées faites par M. Ångström ainsi que par d'autres savants nous permettent de ne pas nous occuper

de cette question, renvoyant le lecteur aux mémoires cités plus haut. Néanmoins dans le but d'évaluer le degré de précision pour les appareils pyrhéliométriques employés à Varsovie, pendant 1901-1905, nous donnerons brièvement les formules fondamentales pour cet appareil <sup>(1)</sup>.

On expose une des bandes métalliques très minces à l'action du rayonnement solaire, tandis que l'autre bande, égale autant que possible à la première, est introduite dans un circuit électrique. Si l'on varie l'intensité du courant de façon que les deux bandes soient également échauffées (on le constate au moyen d'un thermoélément relié à un galvanomètre), la quantité de chaleur absorbée par la bande soumise à la radiation est égale à l'énergie apparue dans la seconde bande comme produit du courant. Il importe de remarquer que le refroidissement dû à l'émission, à la convection et à la conductibilité peut être considéré comme le même pour les deux bandes étant donné que celles-ci sont placées l'une auprès de l'autre, symétriquement par rapport aux parois de l'appareil et que leur température est égale.

En désignant par  $Q$  la valeur numérique de l'intensité du rayonnement (en gr. cal.,  $\text{cm}^2$ , min.), par  $a$  le coefficient d'absorption des surfaces des bandes du pyrhéliomètre pour les rayons incidents (cette incidence supposée toujours comme normale), par  $b$  l'épaisseur de la bande en  $\text{cm.}$ , on a pour  $Q$  la formule

$$Q = \frac{60 r}{4,19 a b} \cdot i^2 \left( \frac{\text{gr. cal.}}{\text{cm}^2, \text{min.}} \right) \quad (136)$$

Dans cette formule,  $a$  et  $b$  sont des constantes, tandis que  $r$ , désignant la valeur numérique de la résistance électrique par unité de longueur, varie avec la température  $t$ ;

---

(1) Représenté à la fin de cet ouvrage (voir Pl. I, Fig. 1).

connaissant d'après les mesures préalables  $a$ ,  $b$  et  $r$ , il suffit de mesurer chaque fois l'intensité du courant électrique  $i$  pour pouvoir, en faisant encore une lecture de la température, déduire directement l'intensité du rayonnement.

Pour les lectures de la température  $t$ , on introduit dans l'appareil un thermomètre spécial d'une forme recourbée avec un réservoir noirci qui se trouve dans l'appareil tout près des bandes. La valeur de la température étant évaluée de cette manière on la considère comme sensiblement égale à celle de la bande ombragée, par laquelle passe le courant compensant  $i$  et dont on cherche la résistance électrique  $r$ . M. Ångström admet

$$r_{t,i} = r_{0,0} \cdot (1 + \alpha t) \cdot (1 + \beta i^2) \quad (137)$$

où  $r_{t,i}$  représente la valeur de résistance quand la température dans l'appareil est  $t$  et le courant compensant  $i$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  étant des coefficients. Dans cette supposition, on peut présenter la formule (136) sous la forme

$$Q = c (1 + \alpha t) (1 + \beta i^2) i^2, \text{ où } c = \frac{60 r_{0,0}}{4,19 a b} \quad (138)$$

Ayant évalué préalablement les valeurs  $c$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  pour l'appareil donné, on peut en déduire immédiatement les valeurs de  $Q$  d'après les valeurs observées  $i$  et  $t$ .

Il est important de remarquer que dernièrement, grâce à l'application des matériaux dont la résistance électrique est sensiblement constante pour les différentes températures, la formule (138), moins commode pour les calculs numériques, est devenue superflue. En effet, pour les nouveaux pyrhéliomètres, par suite de la non-variabilité de  $r$ , le terme

$$\frac{60 r}{4,19 a b} = k \quad (139)$$

a une valeur constante et on a pour calculer les valeurs de

l'intensité du rayonnement solaire la formule simple suivante:

$$Q = k. i^2 \quad (140)$$

qui donne les valeurs de la radiation en fonction de l'intensité du courant compensant  $i$ .

§ 26. *Pyrhéliomètre N. 18, employé à Varsovie.*

L'appareil pyrhéliométrique tout entier se compose des parties suivantes <sup>(1)</sup> : d'un tube avec des bandes absorbantes et des thermoéléments ainsi que d'un miliampère-mètre de précision; puis d'un galvanomètre avec échelle et lunette, d'un shunt avec interrupteur et d'un élément électrique, comme source d'énergie. L'examen des indications du galvanomètre (système d'Arsonval avec un petit miroir mobile), qui sert seulement à déterminer l'égalité de la température des bandes, devient superflu.

Il reste seulement à examiner les constantes du pyrhéliomètre et le miliampère-mètre.

Le pyrhéliomètre de compensation N. 13 (construit par M. Sandström à Lund) était employé, pour la conversion en valeur absolue des indications de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, en 1901 et dans la première moitié de 1902. Les constantes de cet appareil, déterminées à Upsala par M. Ångström, sont :

$$\begin{aligned} r_{0,0} &= 0,347 \text{ (ohm/cm)}, \alpha = 0,00324, \beta = 0,60; \\ \alpha &= 0,985 \pm 0,005, b = 0,2 \text{ cm.} \end{aligned}$$

---

(<sup>1</sup>) Voir fig. 1, Pl. I, où sont représentées les parties essentielles de l'appareil pyrhéliométrique, construit par M. K. Ångström.

Il s'ensuit que  $c = 25,22$ ; pour les calculs de l'intensité du rayonnement solaire on a la formule

$$Q = 25,22 (1 + 0,00324 t) (1 + 0,60 i^2) i^2 \quad (141)$$

qui donne  $Q$  (gr. cal., cm<sup>2</sup>, min.) en fonction de l'intensité du courant  $i$  (amp.) et de la température  $t$  (Cels.).

L'aspect seul de la formule (141) permet de voir que l'exactitude des indications du thermomètre ne peut être ici une source d'erreurs notables dans la détermination de  $Q$ . En effet, de la formule (141) on déduit

$$\Delta Q = 0,0817 (1 + 0,60 i^2) i^2 \Delta t \quad (142)$$

ce qui pour la valeur de  $i = 0,3$ , laquelle n'était jamais dépassée pendant les mesures pyrhéliométriques de Varsovie, donne

$$\Delta Q = 0,008 \Delta t \quad (143)$$

On peut en conclure que même l'erreur, qui atteint 0°5 dans la détermination de  $t$ , n'influe pas sur le second chiffre décimal dans la valeur de  $Q$ .

Il faut attribuer une grande importance à la précision du miliampère-mètre, pour lequel en 1901 et 1902 était employé à Varsovie le miliampère-mètre N. 1407 (construit par la maison de Keiser et Schmidt, de Berlin). Son échelle s'étendait jusqu'à 500 miliampères avec les traits de division de cinq en cinq; grâce à une assez grande étendue de cette échelle ainsi que grâce à un miroir placé sous l'aiguille pour éviter la parallaxe, on peut facilement faire les lectures jusqu'à 1 miliampère.

Le miliampère-mètre N. 1407 fut préalablement examiné, en 1901, dans le laboratoire de physique de l'Université de Varsovie par M. Stankewitch, lequel, après des comparaisons avec un magnetomètre, a trouvé que ses lectures brutes doivent être multipliées par un coefficient égal à 1.07.

Ce coefficient était tout d'abord admis pour les calculs des valeurs pyrhéliométriques et actinométriques en 1901 et 1902; mais les comparaisons des années suivantes, faites par l'auteur dans le même laboratoire avec un galvanomètre universel de Siemens et Halske et surtout de nombreuses séries de comparaisons avec un voltamètre à azotate d'argent, nous avaient démontré que le coefficient 1.07 n'avait pas pu être exact. Ces nouvelles comparaisons, terminées en octobre 1904, ont donné le résultat que, en admettant pour le coefficient du miliampère-mètre la valeur 1.00, on fait une erreur probable qui ne dépasse pas 0,1 pour cent. De même, l'influence de la température sur les indications de cet appareil était négligeable pour les variations du thermomètre qui ont été notées pendant les divers mois d'observations.

Il va sans dire que les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire de 1901 et 1902, déjà calculées en admettant le coefficient 1.07, ont été calculées de nouveau, d'après ces nouvelles déterminations.

#### § 27. *Pyrhéliomètres N. 52 et N. 52 bis.*

L'appareil N. 52, construit par M. Rose, mécanicien de l'Université d'Upsala, appartient au type des pyrhéliomètres à résistance électrique constante. Ce pyrhéliomètre a été examiné par M. Ångström et ses constantes (indiquées dans un certificat spécial) étaient les suivantes:  $r = 0,3032 \text{ ohm/cm}$ ,  $b = 0.1496 \text{ cm}$ ,  $a = 0,98$ .

Pour ce pyrhéliomètre, la résistance étant indépendante de la température, on peut appliquer la formule (140) et notamment

$$Q = k i^2 = 29,6 i^2 \quad (144)$$

L'appareil N. 52, par suite de la détérioration accidentelle

d'une des bandes, avait dû être reconstruit et ses nouvelles constantes, d'après les mesures de M. Ångström, en novembre 1904, étaient les suivantes :  $r = 0,294 \text{ ohm/cm}$ ,  $b = 0.149 \text{ cm}$ ,  $a = 0,98$ .

Pour calculer les valeurs de  $Q$  avec cet appareil (désigné après sa reconstruction par le N. 52 *bis*), on se sert de la formule

$$Q = k i^2 = 28,9 i^2 \quad (145)$$

Pour les déterminations de l'intensité du courant compensant, on a employé (en août et en septembre 1904) l'ampère-mètre de précision de Siemens et Halske (N. 40712). Cet ampère-mètre, présentant quelques irrégularités temporaires et nécessitant de fréquentes comparaisons (ce qu'on a fait avec un galvanomètre universel de Siemens et Halske et le miliampère-mètre N. 1407) fut aussitôt remplacé par un «miliampère-mètre transportable» de la maison Hartman et Braun, de Francfort, désigné par le N. 169729.

Ce dernier porte une échelle ayant 150 divisions et mesure l'intensité du courant dans les limites de 0 à 300 miliampères ; il a été examiné à l'Institut physico-technique de Charlottenburg. Le certificat délivré par cet Institut en donne les corrections suivantes :

|                                    | Traits de division | Intensité du courant |
|------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Pour un courant<br>de courte durée | 50.....2 ×         | 50,1 miliampères     |
|                                    | 80.....2 ×         | 80,1 »               |
|                                    | 110.....2 ×        | 109,9 »              |
|                                    | 140.....2 ×        | 139,9 »              |

Pour les courants d'une grande durée, les corrections subissent une légère modification ; le miliampère-mètre, examiné après une exposition d'une heure à la 150<sup>e</sup> division, avait donné les valeurs : 50,0, 79,9, 109,8 et 139,8 au lieu

des nombres correspondants obtenus ci-dessus. D'ailleurs, ces dernières corrections n'ont que peu d'importance pour les mesures de radiation.

Il y a lieu d'ajouter que l'appareil a été examiné dans la position horizontale et à la température de 20° Cels. et que, avant la vérification, on avait mis l'index à zéro au moyen d'une vis de correction.

On voit donc par ce qui précède que les corrections du miliampère-mètre N. 169729 ne dépassent pas, en général, les limites des erreurs possibles des lectures ; cet appareil a fonctionné sans modifications d'une manière tout à fait régulière pendant l'année 1905 pour de nombreuses séries de mesures effectuées pendant ce temps. D'autre part, des comparaisons souvent répétées ont montré que le point zéro n'a pas changé de position et que les variations de la température ambiante n'influaient pas sensiblement sur les indications du miliampère-mètre en question.

#### § 28. *Sur les erreurs probables des mesures pyrhéliométriques.*

La formule fondamentale pour le pyrhéliomètre de compensation nous donne

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta r}{r} + 2 \frac{\Delta i}{i} \quad (146)$$

Pour la discussion du terme  $\frac{\Delta r}{r}$  de l'équation (146), il faut prendre en considération les deux cas suivants. Si la résistance électrique varie avec la température (ce qui a lieu pour le pyrhéliomètre N. 13 de Varsovie), on a

$$r_{t,i} = r_{0,0} (1 + \alpha t) \cdot (1 + \beta i^2) \quad (137 \text{ bis})$$

et l'erreur  $\Delta r_{t,i}$  dépend de deux erreurs particulières. La

première, de caractère systématique pour toute la série des mesures, dépend de la détermination de la valeur de  $r_{0,0}$  ; la seconde, accidentelle, dépend des facteurs de la formule de correction  $(1 + \alpha t)$  et  $(1 + \beta i^2)$ .

La résistance  $r_{0,0}$  était déterminée chaque fois par M. Ångström et se trouve indiquée dans un certificat spécial ; cette valeur de  $r_{0,0}$ , ayant été trouvée empiriquement par des comparaisons faites avec un instrument étalon, contient les erreurs qui entrent dans la détermination des valeurs de  $a$  et  $b$ . M. Ångström a trouvé que les limites des erreurs possibles dans chacune de ces deux constantes ne dépassent pas 0,5 pour cent ; c'est pourquoi l'erreur dans la détermination de  $r_{0,0}$  ne doit pas dépasser un pour cent.

L'erreur dépendant du facteur  $(1 + \alpha t)$  peut être négligée comme étant très faible ; l'erreur provenant de la détermination du facteur  $(1 + \beta i^2)$  dépend de la variabilité du coefficient  $\beta$  qui change sa valeur avec la vitesse de refroidissement de la bande ombragée du pyrhéliomètre, ce qui, d'autre part, dépend de la température de l'air ambiant et des parois de l'appareil. Cette erreur croît en même temps que l'intensité du courant compensant augmente. Pour l'appareil N. 13, qui fonctionnait en 1901 à Varsovie, le coefficient  $\beta$  est égal à 0,60 et le facteur  $(1 + \beta i^2)$  ne dépassait pas 1,045, l'intensité du courant  $i$  n'ayant jamais dépassé 0,27 amp.

D'autre part, M. Ångström a trouvé que les changements dans la vitesse de refroidissement de la bande ombragée n'entraînent plus que 10 pour cent de variation dans la valeur du coefficient ; or, on peut admettre que l'erreur en question ne doit pas dépasser 0,5 pour cent.

Dans le second cas — ce qui se rapporte aux pyrhéliomètres N. 52 et 52 *bis*, employés en 1904 et 1905 à Varsovie — la résistance électrique reste constante et la discussion des erreurs provenant de  $r$  se simplifie considérablement.

L'erreur accidentelle en dépendance des facteurs  $(1 + \alpha t)$  et  $(1 + \beta i^2)$  disparaît totalement et il ne reste plus que l'erreur systématique dans la détermination de  $r$  qui, comme nous l'avons dit plus haut, ne dépasse pas un pour cent.

Passons à la discussion de l'erreur  $\Delta i$  qui se compose de trois erreurs particulières et notamment d'une erreur systématique dépendant de la correction des indications du miliampère-mètre à la température (pour le maximum de cette erreur on peut admettre, d'après les évaluations de M. Westman, 0,4 miliampère); puis d'une erreur accidentelle dépendant de la détermination de la température du miliampère-mètre (qui ne dépasse point 0,2 mil. d'après le même observateur) et finalement d'une erreur de lecture.

Cette dernière erreur ne doit pas dépasser 0,1 d'un intervalle entre deux traits de division consécutifs; pour le miliampère-mètre N. 169729, cela correspond à une erreur de 0,2 mil. Puis, pour les mesures effectuées à Varsovie, l'intensité du courant n'ayant été presque jamais inférieure à 100 miliampères (pour le N. 52, cela correspond à  $Q > 0,3$  gr. cal.), il en résulte que ni l'erreur systématique ni l'erreur accidentelle ne dépassent 0,4 pour cent.

En résumant ce que nous avons dit plus haut, on peut conclure que pour les pyréliomètres à résistance électrique constante, toute l'erreur systématique et toute l'erreur accidentelle ne doivent pas dépasser ensemble 2 pour cent, d'où 1,4 pour cent correspond à l'erreur systématique. Pour les appareils à  $r$  dépendant de la température, l'erreur accidentelle peut être encore jusqu'à 0,5 pour cent plus grande que dans le premier cas.

Remarquons que pour les mesures courantes de la radiation solaire, il entre encore en jeu de nouvelles sources d'erreurs accidentelles comme p. ex. les changements de la radiation pendant une mesure, les divers facteurs dépendant

de l'état de l'atmosphère, les sources secondaires de la chaleur etc. Nous reviendrons encore à cette question dans le paragraphe suivant, en examinant les erreurs accidentelles probables des valeurs particulières de  $Q$ , d'après les résultats des mesures faites à Varsovie.

§ 29. *Sur la formation des moyennes de la radiation et sur les erreurs accidentelles probables des valeurs particulières de  $Q$ .*

Laissant de côté les détails techniques des mesures, remarquons seulement qu'une seule lecture de l'intensité du courant compensant et de la température n'est pas suffisante pour la détermination plus exacte de  $Q$ ; il est nécessaire de combiner les lectures en introduisant dans le circuit électrique, l'une après l'autre, deux bandes pyrhéliométriques. Supposons que, après avoir déterminé la position d'équilibre, on trouve  $l_1$  pour l'intensité respective du courant compensant quand l'une des deux bandes est ombragée; en répétant cette mesure pour l'autre bande (avec la commutation synchrone du courant), on obtient une valeur  $l_2$ . Enfin, on revient à la première position et on lit de nouveau le miliampère-mètre; soit  $l_1'$  la valeur ainsi trouvée. La moyenne s'obtiendra au moyen de la formule

$$l = \frac{1}{4} (l_1 + 2l_2 + l_1') \quad (147)$$

Il faut remarquer que pour la mesure suivante (se composant toujours de 3 lectures), on commence par la seconde bande et la moyenne respective se déduit d'après la formule

$$l = \frac{1}{4} (l_2 + 2l_1 + l_2') \quad (147 \text{ bis})$$

où les index ajoutés à  $l$  indiquent le numéro de la bande. Ajoutons que les oscillations entre les valeurs particulières de  $l$ , qui entrent dans la formation des moyennes, ne dépassent pas généralement un pour cent, quand les conditions atmosphériques sont convenables ; aux cas d'apparition de légers voiles, de nuages etc. autour du soleil, les différences entre les valeurs particulières de  $l$  peuvent être plus considérables.

Il importe de remarquer que pour les oscillations accidentelles de la radiation solaire, un rôle considérable appartient aussi, à côté des influences atmosphériques, à l'action des sources dites secondaires, dépendant de l'orientation de l'appareil contre les objets environnants. De toutes ces considérations, résulte l'avantage de ne pas se borner à une seule mesure (composée de 3 lectures), mais d'effectuer une série de mesures consécutives. A Varsovie, on s'efforçait de faire toujours, autant que possible, 6 mesures consécutives et d'une semblable série, composée de 18 lectures, on a formé une valeur moyenne, en la rapportant au temps correspondant au milieu de la série.

Voici un exemple d'une série complète obtenue, à Varsovie, le 25. VI. 1905 :

|      |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $t.$ | 12 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> | 12 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> | 12 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> | 12 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> | 12 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> | 12 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> |
| $l.$ | 103.1                           | 103.4                           | 102.7                           | 102.6                           | 102.6                           | 102.4                           |
| $Q.$ | 1.229                           | 1.236                           | 1.220                           | 1.217                           | 1.217                           | 1.212                           |

ce qui donne pour la valeur moyenne de  $Q$  — 1.222 ( $t$  — 12<sup>h</sup>23<sup>m</sup>p).

D'après ce que nous avons dit dans le paragraphe précédent sur les erreurs accidentelles des mesures pyrhéliométriques, il serait intéressant de calculer, d'après les matériaux recueillis à Varsovie, les erreurs probables de la valeur particulière de  $Q$ , entrant dans la formation des moyennes. Pour l'exemple cité plus haut, on obtient comme erreur accidentelle

probable de la valeur particulière de  $Q$  le nombre  $\pm 0.0060$  (ce qui représente une erreur de 0,5 pour cent de la valeur mesurée); l'erreur probable du résultat, c.-à-d. de la moyenne de  $Q$  sera seulement  $\pm 0.0024$  ou 0,2 pour cent.

En répétant ces calculs, faits avec les formules connues de la théorie des moindres carrés, pour quelques jours des mois de mai et de juin 1905, on obtient ce résultat que dans les conditions favorables pour les mesures pyrhéliométriques, l'erreur accidentelle probable d'une détermination particulière de la radiation solaire ne dépasse que rarement 0,5 pour cent; elle dépend, en général, des conditions atmosphériques dans le jour en question et, en cas de voiles, nuages etc., elle peut monter jusqu'à un ou encore plus pour cent. En prenant pour valeurs définitives de  $Q$  les moyennes des séries de 6 mesures consécutives, on obtient des erreurs plus petites et notamment en raison de  $1 : \sqrt{6}$ . Lorsque les conditions sont favorables, on a 0,2 pour cent pour l'erreur accidentelle probable de la valeur définitive de  $Q$ ; pour les jours où l'état du ciel est moins favorable, l'erreur en question ne doit que rarement dépasser 0,5 pour cent. Il est d'ailleurs évident que, lorsque les conditions sont peu favorables pour les mesures de la radiation solaire, celles-ci ne doivent pas être effectuées.

On voit d'après ces résultats, qu'en calculant les valeurs de  $Q$  d'après les règles que nous venons d'énoncer, on peut en même temps conserver les limites des erreurs pour le pyrhéliomètre, données au § 28.

### § 30. *Matériaux pyrhéliométriques recueillis à Varsovie.*

Le but principal des mesures pyrhéliométriques faites à Varsovie pendant la période 1901-1905, a consisté non dans la détermination des variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire (pour lesquelles on s'est servi des

mesures actinométriques), mais surtout dans le contrôle des indications des actinomètres du système Ångström-Chwolson par les comparaisons simultanées. De ces comparaisons des actinomètres avec les pyrhéliomètres, on a déduit (voir chap. VI) les valeurs des «coefficients de transmission», qui permettent d'exprimer les valeurs relatives de la radiation, fournies par les actinomètres, en unités absolues (gr. cal.).

Ces comparaisons ont été surtout effectuées:

- 1) en 1901: les 20. III; 27, 28 et 29. IV; 1, 3, 4 et 5. V;  
1, 2 et 4. X.

Observateur: M. B. Stankewitch.

- 2) en 1904: les 14, 17, 18, 19, 21. 28, 29, 30 et 31. VIII;  
1, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 18, 19, 29, 30 et 31. IX;  
1, 24 et 31. X; 1, 4 et 11. XI.

Observateur: M. L. Gorczyński.

- 3) en 1905: les 16 et 17. III; 10, 21, 23, 24, 26, 27, 29 et  
30. IV; 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 16, 22, 25, 27, 29,  
30 et 31. V; 1, 5, 6, 15, 23, 25, 27 et 30. VI;  
1 et 2. VII; 26 et 30. VIII; 7 et 12. IX; 10.  
X; 20. XII.

Observateur: M. L. Gorczyński (pendant les  
journées des 26 et 30. VIII; 7 et 12. IX et  
10. X, observateur M. S. Bouffall).

En 1901, on a effectué 134 mesures pyrhéliométriques, en 1904 — 198 et en 1905 — 691. On a fait en tout, à Varsovie, durant la période 1901-1905, 1023 mesures pendant 78 jours d'observation.

Tous ces matériaux seront utilisés dans les paragraphes suivants pour la détermination des «coefficients de transmission».

---

## CHAPITRE SIXIÈME

Comparaisons des pyrhéliomètres avec les actinomètres et degré de précision des données actinométriques en gr. cal.

§ 31. *Sur la variabilité du «coefficient de transmission» de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.*

Malgré la détermination, d'après les mesures actinométriques, des moyennes définitives ( $\omega$ ) de l'intensité (voir § 22), notre tâche de trouver les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire n'est pas encore terminée. Nous savons, en effet, que

$$Q = \frac{1}{\alpha} q = \frac{1}{\alpha} K' \cdot \omega \quad (148)$$

où  $\alpha$  désigne le pouvoir absorbant des surfaces noircies et  $Q$  — l'intensité de la radiation, arrivant à l'appareil. Le multiplicateur  $K'$  a été considéré par M. Chwolson (l. c.) et par les observateurs suivants comme une «constante» de l'appareil, dont la valeur peut être calculée d'après quelques comparaisons avec un pyrhéliomètre. Cette conclusion serait justifiée, si  $K'$  avait dépendu seulement de  $c$  et  $s$ , comme dans l'ancienne théorie ; mais, d'après les résultats exposés au § 8, nous savons que  $K'$  dépend aussi de  $d$ ,  $h$  et  $k$  et représente un coefficient de transmission variable avec la valeur mesurée (dans une direction déterminée). Pour déterminer les valeurs

de ce «coefficient», il faut entreprendre de nombreuses séries de comparaisons avec un pyrhéliomètre, dans les diverses conditions atmosphériques.

Il est important et intéressant de remarquer que, dans les comparaisons des indications de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson avec le pyrhéliomètre de compensation, une autre cause se fait encore valoir, laquelle tend aussi à une certaine variabilité du coefficient de transmission. En effet, la radiation pénètre dans le pyrhéliomètre par les diaphragmes dans les limites d'un angle sphérique très étroit, tandis que cet angle est très obtus pour les surfaces absorbantes de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, non munies de diaphragmes. Etant donné que cette influence est moins accentuée pour les hauteurs plus basses du soleil (c.-à-d. pour les intensités plus faibles du rayonnement) que pour des hauteurs plus grandes, on est facilement amené à la conclusion de la variabilité du «coefficient de transmission» de l'actinomètre dans le sens déterminé. Ce sens correspond d'ailleurs au caractère des variations du coefficient qui résultent de la modification de l'ancienne théorie de l'actinomètre.

Remarquons que l'application des formules simplifiées peut conduire aussi à certaines variations dudit coefficient, dans le même sens que les causes précédentes.

### § 32. Valeurs des «coefficients de transmission» pour les actinomètres de Varsovie.

1) Commençons par l'actinomètre NN. 44, 29 qui a fonctionné pendant les quatre années consécutives 1902-1905 et qui fut l'objet de comparaisons particulièrement nombreuses avec le pyrhéliomètre de compensation (N. 52 en 1904 et N. 52 bis en 1905).

Ces comparaisons furent effectuées pendant les mois d'août et septembre 1904 et mars, avril, mai et juin 1905 ; ajoutons que ces comparaisons ayant nécessité des mesures simultanées des deux observateurs, l'auteur du présent travail fut secondé pour les mesures actinométriques par un observateur appartenant au personnel de la Station Centrale Météorologique de Varsovie.

On a effectué ensemble 116 (en 1904) et 327 (en 1905) déterminations simultanées pendant 39 jours. Les données pyrhéliométriques (groupées en 5 ou 6) ont été comparées avec les indications correspondantes de l'actinomètre, groupées d'une manière analogue. La tab. III présente les résultats de ces comparaisons, obtenus après le rejet préalable des séries non parfaitement simultanées ou bien effectuées dans des conditions un peu moins favorables.

( Voir la table III, page 92 )

En classifiant les valeurs ainsi obtenues en groupes, d'après les indications de l'actinomètre et en formant les moyennes pour chacun des groupes, on obtient :

| Groupe<br>actinométrique | Ind. moy.<br>de l'actin. | Ind. moy.<br>du pyrh. | Val. moy.<br>de K' | Nombre de<br>compar. |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| à 1.09                   | 1.023                    | 0.830                 | 0.811              | 3                    |
| de 1.10 à 1.19           | 1.147                    | 0.968                 | 0.844              | 11                   |
| de 1.20 à 1.29           | 1.252                    | 1.080                 | 0.863              | 15                   |
| de 1.30                  | 1.324                    | 1.170                 | 0.882              | 5                    |

D'où, après une légère rectification, admettons les coefficients suivants pour les valeurs relatives de l'actinomètre (NN. 44, 29) :

|                                   |       |       |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Valeur relative de l'actinomètre. | 1.00  | 1.10  | 1.20  | 1.30  |
| Coefficient de transmission.....  | 0.805 | 0.829 | 0.853 | 0.877 |

Table III. — Valeurs des « coefficients de transmission » de l'actinomètre (NN. 44, 29)

| DATE     | Temps moyen<br>de<br>comparaisons | Act. | Pyrh. | $K' = \frac{A}{P}$ |
|----------|-----------------------------------|------|-------|--------------------|
| 1904     |                                   |      |       |                    |
| 17. VIII | 9 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> a  | 1.23 | 1.045 | 0.850              |
| »        | 10.50 a                           | 1.24 | 1.10  | 0.887              |
| »        | 11.20 a                           | 1.26 | 1.08  | 0.857              |
| »        | 11.50 a                           | 1.27 | 1.12  | 0.882              |
| 18. VIII | 12.20 p                           | 1.17 | 0.95  | 0.812              |
| 29. VIII | 11.55 a                           | 1.32 | 1.17  | 0.886              |
| 30. VIII | 1.15 p                            | 1.27 | 1.09  | 0.858              |
| 1. IX    | 8.55 a                            | 1.28 | 1.14  | 0.891              |
| »        | 9.25 a                            | 1.32 | 1.16  | 0.879              |
| »        | 1. 5 p                            | 1.37 | 1.21  | 0.883              |
| 2. IX    | 8.55 a                            | 1.11 | 0.94  | 0.847              |
| 19. IX   | 10.55 a                           | 1.26 | 1.10  | 0.873              |
| 29. IX   | 12.15 p                           | 1.21 | 0.99  | 0.818              |
| 30. IX   | 12.40 p                           | 1.16 | 0.98  | 0.845              |
| 1905     |                                   |      |       |                    |
| 16. III  | 12. 0 p                           | 1.22 | 1.054 | 0.864              |
| »        | 12.40 p                           | 1.26 | 1.09  | 0.865              |
| 27. IV   | 9.55 a                            | 1.15 | 0.96  | 0.835              |
| »        | 10.20 a                           | 1.12 | 0.974 | 0.869              |
| »        | 11. 5 a                           | 1.15 | 0.99  | 0.861              |
| »        | 11.55 a                           | 1.17 | 1.035 | 0.885              |
| 29. IV   | 12.50 p                           | 1.13 | 1.00  | 0.885              |
| 2. V     | 7.45 a                            | 1.00 | 0.847 | 0.847              |
| 3. V     | 8.30 a                            | 1.03 | 0.826 | 0.802              |
| »        | 9. 5 a                            | 1.15 | 0.93  | 0.809              |
| »        | 10.45 a                           | 1.04 | 0.816 | 0.785              |
| »        | 12.15 p                           | 1.18 | 0.951 | 0.806              |
| 6. V     | 8.45 a                            | 1.24 | 1.079 | 0.870              |
| 27. V    | 9.45 a                            | 1.28 | 1.103 | 0.862              |
| »        | 11.30 a                           | 1.30 | 1.175 | 0.900              |
| 29. V    | 9.15 a                            | 1.13 | 0.936 | 0.828              |
| »        | 11. 0 a                           | 1.25 | 1.069 | 0.055              |
| »        | 11.30 a                           | 1.27 | 1.092 | 0.860              |
| 30. V    | 12.50 p                           | 1.31 | 1.129 | 0.862              |
| 31. V    | 11.50 a                           | 1.24 | 1.060 | 0.855              |

Pour les autres valeurs, contenues dans ces limites ou les dépassant un peu, on trouve leurs coefficients respectifs par une simple interpolation ; remarquons cependant que, le coefficient augmentant d'une manière égale dans tous les intervalles, nous n'en préjugeons pas encore que cette simple proportionnalité y soit nécessaire.

On voit par les résultats obtenus que l'expérience confirme pleinement la variabilité du « coefficient de transmission », prévu plus haut (voir § 8) par la théorie ; ce coefficient croît de 2 pour cent environ avec une augmentation de l'intensité du rayonnement de 0,1 gr. cal.

2) L'actinomètre (NN. 60, 57) fut comparé avec le pyrhéliomètre N. 13 en 1901 pendant quatre mois ; les deux observateurs ont été : M. Stankewitch (pyrhéliomètre) et M. Gorczyński (actinomètre).

La classification des résultats obtenus, analogue à celle que nous avons indiquée tout à l'heure, nous donne

| Groupe<br>actinométrique | Ind. moy.<br>de l'actin. | Ind. moy.<br>du pyrh. | Val. moy.<br>de K' | Nombre de<br>compar. |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| de 0.95 à 1.20           | 1.111                    | 0.818                 | 0.737              | 7                    |
| de 1.30 à 1.40           | 1.366                    | 1.016                 | 0.744              | 5                    |
| de 1.50 à 1.75           | 1.627                    | 1.220                 | 0.750              | 15                   |

L'absence de quelques groupes intermédiaires s'explique par ce fait que, dans les jours où s'effectuaient les comparaisons, les valeurs correspondantes de l'actinomètre n'ont pas été mesurées.

Comme précédemment, nous admettons, pour la réduction des valeurs relatives de l'actinomètre NN. 60, 57, les coefficients suivants :

|                                    |       |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Valeur relative de l'actinomètre : | 1.00  | 1.20  | 1.40  | 1.60  |
| Coefficient de transmission :      | 0.734 | 0.739 | 0.744 | 0.749 |

Le coefficient croît, mais beaucoup plus faiblement que

dans le cas précédent ; son augmentation ne dépasse pas 0,3 pour cent environ, quand la radiation augmente de 0,1 gr. cal.

3) L'actinomètre d'été (NN. 63, 64) a été employé seulement pendant treize jours de l'été 1903 et 1904 ; le 27 VI. 1904, un de ses thermomètres fut détérioré ce qui empêcha de faire des comparaisons ultérieures avec un pyrhéliomètre de compensation. Cet actinomètre a été cependant comparé, pendant les mois de juillet 1903 et de juin 1904, avec un autre actinomètre (NN. 44, 29), dont les coefficients de transmission ont été signalés plus haut. D'après ces comparaisons, il résulte que, pour les valeurs relatives 1.00, le coefficient de cet actinomètre est égal à 0.94, pour 1.10 à 0.96 et pour 1.20 à 0.98, ce qui donne un changement de 2 pour cent environ, quand la radiation augmente de 0,1 gr. cal.

4) L'actinomètre d'été (NN. 69, 70) fut plusieurs fois comparé (aux mois de mai et de juin 1905) avec le pyrhéliomètre de compensation N. 52 *bis*. Pendant ce temps, on a effectué 200 mesures environ, dont une partie assez considérable a dû néanmoins être rejetée à cause de la non-parfaite simultanéité des mesures ou des conditions de l'atmosphère non suffisamment favorables pour les comparaisons. Les mesures conservées ont été groupées en 8 séries dont résultent les valeurs suivantes du coefficient de transmission : 1.005 pour les indications 1.00 et 1.035 pour les indications 1.10 du même actinomètre. La variation est donc égale à 3 pour cent, quand la radiation augmente de 0,1 gr. cal.; ajoutons que, pendant l'été 1905, les valeurs observées de l'intensité du rayonnement ne s'écartaient que peu des intervalles indiqués.

Tous ces résultats concourent à prouver que, non seulement les valeurs du « coefficient de transmission » croissent,

comme l'a fait prévoir la théorie, avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement, mais que le degré de variabilité de ce coefficient est différent et, pour ainsi dire, individuel pour chaque actinomètre du système Ångström-Chwolson. Ce résultat ne saurait cependant nous étonner, puisque cette variabilité dépend du facteur

$$\frac{1}{1 - \frac{d \cdot h}{k}} \quad (149)$$

dans lequel entrent les valeurs de  $d$  et  $h$  ; or, ces dernières, représentant les propriétés de la masse du verre de l'actinomètre donné, ne sont pas nécessairement les mêmes pour chaque appareil.

Il s'ensuit de même que l'admission, au lieu de coefficients variables de transmission, d'une « constante » de l'appareil, comme cela est indiqué dans la théorie de M. Chwolson, peut entraîner des erreurs jusqu'à 10 pour cent ou plus, suivant le degré de variabilité du coefficient. Nous avons dit plus haut que cette admission avait déjà rendu non comparables de nombreuses séries de mesures actinométriques, publiées jusqu'ici.

### § 33. *Sur le degré de précision des données actinométriques en gr. cal.*

Etant en possession des valeurs relatives ( $\omega$ ) (voir § 22) et des coefficients de transmission  $K'$ , indiqués tout à l'heure, nous pouvons former les valeurs définitives de l'intensité de la radiation en gr. cal. au moyen de la formule

$$Q = K' \cdot (\omega) \quad (150)$$

Ayant trouvé les valeurs  $Q$ , il nous reste encore à répondre

à la question décisive : quel degré de précision peut-il être attribué aux valeurs de la radiation solaire en gr. cal., ainsi obtenues ?

Pour l'évaluer, récapitulons les résultats relatifs à ce sujet, trouvés dans les paragraphes précédents. Pour les mesures pyrhéliométriques, nous avons vu que

*a)* L'erreur systématique totale, dépendant de la détermination des constantes de l'appareil et de la résistance électrique, ne dépasse pas une limite, dont le maximum est égal, d'après M. Ångström, à 1,4 pour cent de la valeur mesurée.

*b)* La somme des erreurs accidentelles, dépendant des lectures et des corrections du pyrhéliomètre et du miliampère-mètre, ne doit pas dépasser 0,6 pour cent pour chaque mesure particulière ; seulement, pour les anciens appareils pyrhéliométriques, dans lesquels la résistance électrique variait avec la température, cette limite peut atteindre 1,2 pour cent.

*c)* Dans les conditions habituelles des mesures pyrhéliométriques de Varsovie, les erreurs accidentelles probables des valeurs particulières de l'intensité du rayonnement solaire ne dépassaient 0,5 pour cent que dans les cas de voiles et de nuages légers autour du soleil.

*d)* En prenant, comme il a été convenu, pour les valeurs définitives les moyennes d'après cinq mesures consécutives, on peut considérer que leurs erreurs totales (accidentelles) ne dépassent pas, en général, 0,3 pour cent de la valeur mesurée.

D'autre part, nous avons trouvé pour les valeurs relatives, d'après les mesures actinométriques, que :

*e)* La somme des erreurs accidentelles dans la détermination de la valeur particulière de  $\omega$  (prise comme moyenne de

deux mesures dans les directions opposées) ne doit pas dépasser 3 pour cent dans les cas moins favorables de l'accumulation des erreurs, provenant de l'état de l'atmosphère ainsi que des lectures thermométriques et de l'évaluation des intervalles de temps.

*f)* Dans les conditions habituelles des mesures actinométriques de Varsovie, les erreurs accidentelles probables d'une valeur particulière de  $\omega$  ne dépassaient pas, d'après les matériaux recueillis, un pour cent environ.

*g)* Les erreurs accidentelles probables des valeurs définitives ( $\omega$ ), prises comme moyennes de cinq valeurs particulières, ne dépassaient pas 0,5 pour cent pour les actinomètres de Varsovie.

Pour donner maintenant une réponse décisive à la question du degré de précision des valeurs  $Q$ , obtenues avec les actinomètres, il faut encore évaluer le degré d'exactitude des valeurs des «coefficients de transmission». Ces coefficients étant obtenus par des comparaisons des valeurs moyennes d'après les mesures simultanées du pyrhéliomètre et de l'actinomètre, leur degré de précision dépend, par conséquent, de l'un et de l'autre. Etant donné que ces valeurs du coefficient ont été prises, comme moyennes d'après quelques comparaisons, il y a lieu de croire que l'erreur probable dans la détermination du «coefficient de transmission» ne doit pas dépasser 0,5 pour cent.

*h)* Dans la conclusion générale, on peut admettre que les erreurs accidentelles des valeurs  $Q$  (en gr. cal.) de l'intensité du rayonnement solaire, obtenues avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson d'après les méthodes indiquées plus haut, ne dépassent pas, en général, un pour cent. Quant

à l'erreur systématique, commune à toute la série des mesures, elle est identique à celle du pyréliomètre, pris dans chaque cas comme étalon.

Ce résultat d'une importance particulière pour nos recherches, indique en même temps que l'actinomètre du système Ångström-Chwolson permet réellement — à la condition de compléter l'ancienne théorie et de former les moyennes « définitives » — d'obtenir un degré de précision pouvant atteindre un pour cent et qu'il a, par conséquent, droit à une juste place parmi les actinomètres de précision.

Il était indispensable et, en même temps, suffisant d'arriver à ce résultat fondamental pour pouvoir passer — dans les chapitres suivants — à l'étude des variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire et d'autres problèmes météorologiques qui s'y rattachent.

---

## PARTIE B

*Sur la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire et sur les sommes de chaleur.*



## CHAPITRE SEPTIÈME

Sur les réductions fondamentales pour les valeurs  
de l'intensité du rayonnement solaire.

§ 34. *Matériaux actinométriques recueillis à Varsovie pendant  
les années 1901-1905.*

Ces matériaux se composent de 7622 mesures, comprenant chacune 5 lectures doubles de thermomètres dans des intervalles de 30 secondes. Le nombre des jours d'observation est égal, dans la période indiquée, à 389 ; toutes ces données ne comprennent pas les mesures pyrhéliométriques dont nous avons parlé plus haut (voir § 30).

Comme lieu d'observation, on avait choisi, en 1901, la terrasse du sud de l'Observatoire astronomique de Varsovie, entouré de deux grands parcs. Dans les quatre années suivantes 1902-1905, les appareils actinométriques et pyrhéliométriques furent installés sur la terrasse supérieure de la Station Centrale Météorologique de Varsovie (excepté la période du 28. I au 4. VI 1902, pendant laquelle les mesures furent effectuées dans un petit jardin situé près de l'Institut physique de l'Université).

Ajoutons que la terrasse supérieure de la Station Centrale est située 25 m. au-dessus du niveau moyen des rues adjacentes et que la hauteur du lieu d'observation au niveau de la mer ne dépasse pas 130 m.

De toutes les mesures prises, une grande partie (3842 mesures) appartient à l'année 1901; en 1902, on en a effectué 793, en 1903 319, en 1904 1651 et en 1905 1017. Ces différences sont dues non seulement à l'état de l'atmosphère pendant ces années (comme p. ex. l'année 1903, exceptionnelle au point de vue de l'insolation), mais aussi aux mesures spéciales, prises pour l'évaluation des valeurs de réduction (p. ex. en 1901), aux comparaisons avec les pyrhéliomètres, etc.

Le nombre des mesures effectuées habituellement pendant une journée ne dépassait pas, en général, une vingtaine environ; ainsi, sur 389 jours d'observation, on en compte 320 avec un nombre de mesures ne dépassant pas 30, 42 avec un nombre de mesures entre 31 et 60; 16 jours ont un nombre entre 61 et 90, 8 jours en ayant moins de 120, 1 jour avec 150 et enfin 2 jours ayant environ 180 mesures.

Les matériaux recueillis pendant des périodes assez longues de la journée sont d'une importance particulière pour l'évaluation des valeurs de réduction de l'intensité du rayonnement à la hauteur du soleil; les autres servent principalement à établir la marche annuelle.

Quant au choix des jours et du temps d'observation, on tâchait d'effectuer les mesures toutes les fois que les conditions atmosphériques étaient suffisamment favorables et que les voiles autour du soleil, les passages fréquents de nuages etc., ne gênaient par trop l'exécution des mesures. La majeure partie ( $\frac{3}{4}$  environ) de toutes les mesures a été effectuée de 10<sup>h</sup><sub>a</sub> à 1<sup>h</sup><sub>p</sub>.

Tous les nombres cités plus haut se rapportent aux mesures particulières de la radiation; les valeurs définitives qui en ont été formées, d'après la méthode indiquée au § 22, sont au nombre de 864. Elles ont été obtenues en 354 jours d'observation, pendant la période 1901-1905, un certain

nombre de mesures et de jours ayant été exclus par suite de la discontinuité des séries.

Pour les mois consécutifs des cinq années 1901-1905, ces valeurs «définitives» sont réparties de la manière suivante :

| Mois...                          | I  | II | III | IV | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X  | XI | XII | Total |
|----------------------------------|----|----|-----|----|-----|-----|-----|------|-----|----|----|-----|-------|
| Nombre des valeurs définitives.  | 30 | 40 | 75  | 77 | 175 | 108 | 89  | 63   | 112 | 55 | 16 | 24  | 864   |
| Nombre de jours d'observation... | 21 | 24 | 30  | 28 | 55  | 35  | 38  | 34   | 40  | 20 | 15 | 24  | 354   |

De toutes les années, c'est de nouveau l'année 1901 qui donne le plus grand nombre de valeurs définitives (339) ; le plus petit nombre se trouve en 1903.

Ces 864 valeurs définitives ont été converties en gr. cal. au moyen des coefficients de transmission (voir § 32) ; puis, on a calculé, pour le temps correspondant à chaque mesure, les valeurs de la hauteur du soleil, de l'humidité absolue en mm. et de quelques autres éléments météorologiques.

Pour calculer la hauteur  $h$  du soleil, on a la formule bien connue

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos s \quad (151)$$

où  $\varphi$  désigne la latitude de l'endroit,  $\delta$  la déclinaison et  $s$  l'angle horaire du soleil. La déclinaison  $\delta$  du soleil a été tirée de la «Connaissance de temps» tout en tenant compte de la différence de longitude entre le méridien de Paris et celui de Varsovie.

Pour faciliter les calculs, la formule (151) a été écrite sous la forme

$$\sin h = \frac{\sin \varphi}{\cos M} \cdot \sin (M + \delta) \quad (152)$$

$$\text{où} \quad \text{Tg } M = \text{Ctg } \varphi \cos s \quad (153)$$

représente un angle auxiliaire.

Tous les résultats des mesures, accompagnés des éléments météorologiques, ont été exposés dans des tables spéciales

(non reproduites, ici, in extenso), séparément pour chaque année; nous trouverons plus loin les extraits mensuels des mesures actinométriques de Varsovie contenant les valeurs diurnes de la radiation pour chaque jour d'observation de la période 1901-1905.

Remarquons que les valeurs définitives prises comme moyennes de 5 mesures et converties en gr. cal. figurent dans ces tables avec 3 chiffres décimaux bien que les erreurs accidentelles puissent atteindre un pour cent. Cela a été fait pour faciliter la déduction des variations diurnes et pour éviter l'accumulation des erreurs provenant du rejet du dernier chiffre.

§ 35. *Sur les variations de l'intensité du rayonnement solaire ( $\Delta Q$ ) dépendant de la hauteur du soleil  $h$ , d'après les mesures faites à Varsovie.*

La première question qui se pose dans l'étude des matériaux actinométriques consiste dans la détermination des variations de l'intensité du rayonnement, dépendant de la hauteur du soleil. Dans ce but, on a groupé, d'après les matériaux recueillis, les données pour les jours d'observation, dans lesquels les mesures ont été effectuées pour les diverses hauteurs du soleil; cela fait, on en a déduit immédiatement ou au moyen de l'interpolation les variations de l'intensité avec l'augmentation de la hauteur du soleil de  $9^\circ$  à  $12^\circ$ , de  $12^\circ$  à  $15^\circ$ , de  $15^\circ$  à  $20^\circ$ , de  $20^\circ$  à  $25^\circ$ , de  $25^\circ$  à  $30^\circ$ , de  $30^\circ$  à  $35^\circ$ , de  $35^\circ$  à  $45^\circ$  et de  $45^\circ$  à  $55^\circ$ .

L'accroissement des intervalles, quand les hauteurs deviennent plus grandes, est très commode par suite des diminutions graduelles des  $\Delta Q$  respectifs.

Pour préciser les conditions concernant les différences

interpolées, on a observé la règle que, pour qu'une interpolation soit permise, il faut que les données mesurées comprennent au moins la moitié de l'intervalle pris. En outre, on a toujours choisi, parmi les valeurs mesurées pour les hauteurs données, des valeurs plus élevées (les sommets de la courbe de la marche diurne), afin de se soustraire, autant que possible, à l'influence perturbatrice des dépressions temporaires de la radiation.

Dans la Tab. IV sont indiquées, pour des intervalles successifs, les variations  $\Delta Q$  et, en même temps, leurs dates respectives ; les signes *a.* et *p.* se rapportent aux observations faites avant ou après midi.

(Voir Tabl. IV, p. 106).

Il résulte de cette table que les oscillations dans les valeurs particulières de  $\Delta Q$ , par rapport aux moyennes respectives, sont relativement assez considérables ; ces irrégularités tendent à disparaître quand on prend des moyennes qui présentent une marche assez régulière. Ces oscillations dans les valeurs particulières ne sauraient étonner, leurs causes dépendant du caractère même de la méthode de calcul ; notamment, pendant le temps correspondant à deux valeurs successives de  $Q$  pour les différentes hauteurs du soleil, les conditions atmosphériques, comme p. ex. l'humidité etc., ont pu subir des changements, tandis qu'en prenant leurs différences, on les considère, eo ipso, comme obtenues dans des conditions égales.

D'après notre table, on voit immédiatement ce fait bien connu que les variations de l'intensité du rayonnement tendent à être d'autant plus petites que la hauteur du soleil devient plus grande.

Table IV. — Variations de l'intensité du rayonnement ( $\Delta Q$ ) dépendant des variations de la hauteur du soleil ( $\Delta h$ ), d'après les mesures de Varsovie (1904-1905)

| 9°-12°     |            | 15°-20°    |            | 20°-25°    |            | 25°-30°    |            | 30°-35°    |            | 35°-45°    |            | 45°-55°    |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date       | $\Delta Q$ | Date       | $\Delta Q$ | Date       | $\Delta Q$ | Date       | $\Delta Q$ | Date       | $\Delta Q$ | Date       | $\Delta Q$ | Date       | $\Delta Q$ |
| 11 V 01    | 0.065 p    | 10 II 01   | 0.068 p    | 10 II 01   | 0.108 p    | 12 V 01    | 0.061 p    | 3 IV 01    | 0.052 a    | 3 V 01     | 0.035 a    |            |            |
| 2 VI »     | 0.159 p    | 14 V »     | 0.125 p    | 11 V »     | 0.070 p    | 2 VI »     | 0.021 p    | 24 IV »    | 0.053 p    | 9 V »      | 0.088 a    |            |            |
| 21 VII »   | 0.134 p    | 2 VI »     | 0.118 p    | 2 VI »     | 0.090 p    | 21 VII »   | 0.043 p    | 2 VI »     | 0.057 p    | 12 V »     | 0.058 a    |            |            |
| (3)        |            | 14 VII »   | 0.105 p    | 24 VII »   | 0.060 p    | 11 VIII »  | 0.074 a    | 24 VII »   | 0.073 p    | 5 V »      | 0.08 p     | 2 VI »     | 0.054 p    |
| Moy. 0.119 |            | 21 VII »   | 0.128 p    | 24 IX »    | 0.103 a    | 26 VIII »  | 0.036 p    | 9 V »      | 0.058 p    | 9 V »      | 0.065 a    | 25 VI »    | 0.035 a    |
| 12°-15°    |            | 21 IX »    | 0.143 a    | 22 X »     | 0.084 a    | 21 IX »    | 0.087 a    | 4 IX »     | 0.074 a    | 12 V »     | 0.057 a    | 30 VI »    | 0.047 a    |
| 31 I 01    | 0.135 p    | 23 IX »    | 0.121 p    | 5 X 02     | 0.087 a    | 23 IX »    | 0.065 p    | 21 IX »    | 0.047 a    | 12 V »     | 0.090 p    | 20 VII »   | 0.078 a    |
| 10 II »    | 0.042 p    | 25 IX »    | 0.120 p    | 4 III 04   | 0.122 p    | 16 X »     | 0.083 a    | 22 IX »    | 0.046 a    | 18 V »     | 0.101 a    | 21 VII »   | 0.041 p    |
| 14 V »     | 0.130 p    | 22 X »     | 0.089 a    | 5 III »    | 0.056 a    | 5 X 02     | 0.094 a    | 27 IX »    | 0.056 a    | 2 VI »     | 0.082 p    | 28 VII 03  | 0.089 a    |
| 2 VI »     | 0.100 p    | 5 X 02     | 0.078 a    | 4 III 04   | 0.080 a    | 4 III 04   | 0.080 a    | 22 III 04  | 0.077 a    | 14 VII »   | 0.072 p    | 18 IV 04   | 0.038 a    |
| 24 VII »   | 0.046 p    | 5 X »      | 0.088 p    | 4 III »    | 0.057 p    | 4 III »    | 0.057 p    | 25 V 05    | 0.044 a    | 24 VII »   | 0.047 p    | 9 V »      | 0.039 a    |
| 25 IX »    | 0.111 p    |            |            | 5 III »    | 0.087 p    |            |            |            |            | 29 VI 02   | 0.054 a    | 17 V »     | 0.050 a    |
| 5 X 02     | 0.090 p    |            |            |            |            |            |            |            |            | 13 IV 04   | 0.049 a    |            |            |
|            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | 27 V »     | 0.051 a    |            |            |
|            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | 6 VI »     | 0.087 a    |            |            |
|            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | 7 IX »     | 0.069 a    |            |            |
|            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | 25 V 05    | 0.103 a    |            |            |
| (7)        |            | (14)       |            | (9)        |            | (12)       |            | (11)       |            | (17)       |            | (12)       |            |
| Moy. 0.093 |            | Moy. 0.108 |            | Moy. 0.087 |            | Moy. 0.066 |            | Moy. 0.061 |            | Moy. 0.074 |            | Moy. 0.054 |            |

§ 36. *Sur les variations de l'intensité du rayonnement solaire, dépendant de la hauteur du soleil, à Guimar (île océanique de Ténériffe), à Zakopane (Pologne) et à Treurenberg (Spitzberg).*

Pour comparer les résultats obtenus à Varsovie avec les résultats analogues d'autres endroits, nous allons déduire les variations  $\Delta Q$  pour Guimar, dans l'île de Ténériffe, voisine des régions équatoriales; puis, pour Zakopane, dans les régions tempérées, et enfin pour Treurenberg, situé dans les régions polaires.

1) L'île océanique de Ténériffe est située non loin des côtes occidentales d'Afrique; de nombreuses montagnes s'y élèvent, dont le plus haut sommet atteint 3730 mètres (latitude géographique  $28^{\circ}16'$  N.). Les mesures de l'intensité du rayonnement solaire y ont été faites, pendant quelques jours d'été, en 1895 et 1896, par M. Ångström (avec la collaboration de M. Edelstam); comme instrument de mesures, on a employé le pyrhéliomètre électrique de compensation.

D'après les données exposées dans la publication «Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes; recherches faites à Ténériffe» (Upsala, 1900), nous avons dressé la table suivante concernant les variations de  $Q$  avec la hauteur  $h$  du soleil.

(Voir Tab. V, p. 108).

Table V. — *Variations de la radiation avec la hauteur du soleil. Ténériffe 1896.*

| $\Delta h$ | Alta Vista<br>25; 27<br>VI | Pico de Teyde<br>25; 27<br>VI | Alta Vista<br>29. VI | Ca-<br>ñada<br>29. VI | Alta Vista<br>2. VII | Gui-<br>mar<br>2. VII | Alta Vista<br>3. VII | Gui-<br>mar<br>3. VII | MOYENNES                          |                                  |                                    |                                          |
|------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
|            |                            |                               |                      |                       |                      |                       |                      |                       | Gui-<br>mar<br>H=360 <sup>m</sup> | Ca-<br>ñada<br>2125 <sup>m</sup> | Alta<br>Vista<br>3252 <sup>m</sup> | Pico<br>de<br>Teyde<br>3683 <sup>m</sup> |
| 5°-10°     | 0.239                      | 0.259                         | —                    | —                     | —                    | —                     | —                    | —                     | —                                 | —                                | 0.239                              | 0.259                                    |
| 10°-15°    | 0.135                      | 0.119                         | 0.120                | 0.145                 | 0.106                | 0.185                 | 0.166                | 0.133                 | 0.159                             | 0.145                            | 0.132                              | 0.119                                    |
| 15°-20°    | 0.080                      | 0.086                         | 0.097                | 0.093                 | 0.097                | 0.093                 | 0.067                | 0.095                 | 0.094                             | 0.093                            | 0.083                              | 0.086                                    |
| 20°-30°    | 0.098                      | 0.102                         | 0.091                | 0.108                 | 0.097                | 0.144                 | 0.101                | 0.135                 | 0.140                             | 0.108                            | 0.097                              | 0.102                                    |
| 30°-40°    | 0.060                      | 0.064                         | 0.055                | 0.068                 | 0.064                | 0.087                 | 0.053                | 0.077                 | 0.082                             | 0.068                            | 0.059                              | 0.064                                    |
| 40°-50°    | 0.032                      | 0.025                         | 0.032                | 0.028                 | 0.043                | 0.060                 | 0.038                | —                     | 0.060                             | 0.028                            | 0.036                              | 0.026                                    |
| 50°-70°    | 0.033                      | 0.037                         | 0.035                | —                     | 0.035                | 0.060                 | 0.023                | —                     | 0.060                             | —                                | 0.032                              | 0.037                                    |
| 70°-85°    | 0.017                      | 0.007                         | 0.016                | —                     | 0.019                | 0.030                 | 0.007                | —                     | 0.030                             | —                                | 0.015                              | 0.007                                    |

2) Dans la période du 11 août au 1<sup>er</sup> octobre 1903, les mesures pyrhéliométriques ont été effectuées au milieu de la vallée de Zakopane, en Galicie, par M. A. Witkowski; les résultats de ces mesures, accompagnées des éléments météorologiques nécessaires, ont paru dans la publication «Wypadki spostrzezen meteorologicznych w Galicyi» de l'Observatoire de l'Université de Cracovie (sous la direction de M. Rudzki).

D'après les mesures de M. Witkowski, effectuées avec le pyrhéliomètre de compensation, on a dressé la table des variations  $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$  d'une manière identique à celle qui a été employée à Varsovie; les moyennes, ainsi obtenues, sont les suivantes :

$\Delta h$ . . . . 5°-10°, 10°-15°, 15°-20°, 20°-25°, 25°-30°, 30°-35°,  
35°-40°, 40°-45°, 45°-50°.

$\Delta Q$ . . . . 0.262, 0.166, 0.122, 0.092, 0.077, 0.063,  
0.049, 0.041, 0.032.

Les mesures ayant été effectuées aussi souvent que possible pour chaque journée d'observation, les matériaux recueillis à Zakopane, pour les variations avec la hauteur du soleil, sont relativement assez nombreux, malgré la courte période des mesures.

3) Enfin, on a utilisé les mesures effectuées par M. Westman à Treurenberg en 1899-1900, pendant l'expédition géodétique au Spitzberg.

Les coordonnées du lieu d'observation sont :  $\varphi = 79^{\circ}55'$ ,  $\lambda = 1^{\text{h}}7^{\text{m}}26^{\text{s}}$  E. Gr.; le terrain est rocheux et le point le plus élevé dans les environs ne dépasse pas 30 m. au-dessus du niveau moyen de la mer.

Les variations  $\Delta Q$  avec  $\Delta h$ , déduites déjà par M. Westman, sont les suivantes :

Table VI. — *Variations de l'intensité du rayonnement avec la hauteur du soleil. Treurenberg 1899/1900.*

| $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| 2°-3°      | 0.097 | 8°-9°      | 0.052 | 14°-15°    | 0.031 | 20°-21°    | 0.018 | 26°-27°    | 0.013 |
| 3°-4°      | 85    | 9°-10°     | 45    | 15°-16°    | 30    | 21°-22°    | 16    | 27°-28°    | 16    |
| 4°-5°      | 84    | 10°-11°    | 40    | 16°-17°    | 21    | 22°-23°    | 16    | 28°-29°    | 15    |
| 5°-6°      | 78    | 11°-12°    | 41    | 17°-18°    | 18    | 23°-24°    | 15    | 29°-30°    | 12    |
| 6°-7°      | 63    | 12°-13°    | 33    | 18°-19°    | 17    | 24°-25°    | 15    | 30°-31°    | 10    |
| 7°-8°      | 0.055 | 13°-14°    | 0.033 | 19°-20°    | 0.020 | 25°-26°    | 0.014 | 31°-32°    | 08    |
|            |       |            |       |            |       |            |       | 32°-33°    | 0.007 |

Il résulte du caractère des variations  $\Delta Q$  que la courbe  $Q = f(h)$  est concave par rapport à l'axe  $h$ , le quotient  $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$  diminuant avec l'augmentation de  $h$ . Ce résultat correspond

tout à fait aux résultats obtenus à Varsovie, à Zakopane et à Ténériffe.

Les valeurs de  $\Delta Q$  ont été données aussi pour Sonnblick (3106 m.) par M. Exner; elles sont (voir Meteor. Zeitschrift, Vol. XX, pp. 409-414, 1903) les suivantes :

|                         |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hauteurs du soleil . .  | 10°  | 20°  | 30°  | 40°  | 50°  | 60°  | 70°  |
| Valeurs de l'int. . . . | 1.10 | 1.28 | 1.39 | 1.47 | 1.53 | 1.58 | 1.60 |

Les variations  $\Delta Q$  avec  $\Delta h$ , qui en résultent, sont un peu moins grandes que celles qui furent obtenues par M. Ångström à Alta-Vista (3252 m.), à Ténériffe.

Enfin, dans les résultats des mesures, publiés par MM. H. H. Kimball, H. N. Davis, G. B. Rizzo, A. Bartoli et E. Stracciati, C. Chistoni et R. Holm, se trouvent d'importants matériaux pour les variations en question. De même, de longues séries ont été obtenues à Montpellier et à Lausanne-Clarens; mais ces séries ayant été publiées en moyennes diurnes, il nous est impossible, de les utiliser pour l'étude des variations de l'intensité avec la hauteur du soleil.

Enfin, quant aux longues séries des mesures effectuées à Pawlowsk et Pétersbourg, avec l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, elles ne peuvent être utilisées par suite de l'incertitude que présente leur réduction en gr. cal. au moyen d'une « constante » de l'appareil. Nous avons vu plus haut (§ 8) qu'une constante n'étant pas admissible pour cet actinomètre, les valeurs ainsi calculées cessent d'être comparables.

### § 37. Valeurs de la réduction à la hauteur du soleil, pour Varsovie.

Avant d'aller plus loin, comparons les variations  $\Delta Q$  avec  $h$ , obtenues pour Ténériffe (Guimar situé à 360 m.), Zakopane, Varsovie et Treurenberg. Nous obtenons les données suivantes :

Table VII. — *Variations de l'intensité du rayonnement avec la hauteur du soleil à Treurenberg, Varsovie, Zakopane et Guimar.*

| <i>h</i> | Treurenberg<br>(1899/1900) | Varsovie<br>(1901-1905) | Zakopane<br>1903 | Guimar<br>(Ténériffe)<br>1896 | Moyennes |
|----------|----------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|----------|
| 2°-3°    | 0.097                      | —                       | —                | —                             | —        |
| 3°-6°    | 0.247                      | —                       | —                | —                             | —        |
| 6°-9°    | 0.170                      | —                       | 0.156            | —                             | —        |
| 9°-12°   | 0.126                      | 0.119                   | 0.116            | 0.113                         | 0.119    |
| 12°-15°  | 0.097                      | 0.093                   | 0.093            | 0.087                         | 0.093    |
| 15°-20°  | 0.106                      | 0.108                   | 0.122            | 0.094                         | 0.108    |
| 20°-25°  | 0.080                      | 0.087                   | 0.092            | 0.074                         | 0.083    |
| 25°-30°  | 0.070                      | 0.066                   | 0.077            | 0.066                         | 0.070    |
| 30°-35°  | —                          | 0.061                   | 0.063            | 0.047                         | 0.057    |
| 35°-45°  | —                          | 0.074                   | 0.090            | 0.068                         | 0.077    |
| 45°-55°  | —                          | 0.054                   | —                | 0.047                         | —        |
| 55°-70°  | —                          | —                       | —                | 0.040                         | —        |
| 70°-85°  | —                          | —                       | —                | 0.030                         | —        |

Les moyennes de ces quatre stations sont accidentellement à peu près égales aux variations trouvées pour Varsovie.

Il nous reste encore à établir les valeurs définitives de la réduction, pour Varsovie, dans les intervalles de chaque degré. En nous servant d'une simple interpolation et en rectifiant légèrement quelques valeurs intermédiaires, on obtient :

(Voir Tab. VIII, p. 112)

Cette table permet de réduire avec facilité à une hauteur quelconque, dans les limites indiquées, les valeurs de la radiation obtenues à une hauteur différente du soleil. Ainsi, p. ex., pour passer de la hauteur de 10° à celle de 20°, il faut ajouter 0,278 gr. cal. de 25° à 46° — 0,210 gr. cal. etc., etc.

*Remarque importante.* En se servant des réductions, il

Table VIII. — *Valeurs de réduction à la hauteur pour Varsovie.*

| $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       | $\Delta Q$ |       |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| 8°-9°      | 0.047 | 20°-21°    | 0.018 | 35°-36°    | 0.009 | 50°-51°    | 0.005 |
|            |       | 21-22      | 17    | 36-37      | 9     | 51-52      | 5     |
|            |       | 22-23      | 17    | 37-38      | 8     | 52-53      | 4     |
|            |       | 23-24      | 16    | 38-39      | 8     | 53-54      | 4     |
| 9-10       | 43    | 24-25      | 15    | 39-40      | 8     | 54-55      | 4     |
| 10-11      | 0.040 | 25-26      | 0.015 | 40-41      | 0.007 | 55-56      | 0.003 |
| 11-12      | 37    | 26-27      | 14    | 41-42      | 7     | 56-57      | 3     |
| 12-13      | 34    | 27-28      | 14    | 42-43      | 7     | 57-58      | 3     |
| 13-15      | 31    | 28-29      | 14    | 43-44      | 7     | 58-59      | 3     |
| 14-15      | 28    | 29-30      | 13    | 44-45      | 7     | 59-60      | 3     |
| 15-16      | 0.025 | 30-31      | 0.013 | 45-46      | 0.006 | 60-61      | 0.003 |
| 16-17      | 23    | 31-32      | 12    | 46-47      | 6     | 61-62      | 3     |
| 17-18      | 21    | 32-33      | 11    | 47-48      | 6     |            |       |
| 18-19      | 20    | 33-34      | 11    | 48-49      | 6     |            |       |
| 19-20      | 19    | 34-35      | 10    | 49-50      | 5     |            |       |

importe de remarquer qu'il ne faut pas dépasser, autant que possible, les limites des variations dans la hauteur du soleil pour l'endroit indiqué et pour la période donnée. Ainsi, p. ex., la réduction de 5° à 50° pour une valeur trouvée à Varsovie pendant le mois de décembre, serait, à priori, peu certaine, la dernière hauteur n'étant pas atteinte à Varsovie dans cette période de l'année. Par suite des grandes différences des chemins, parcourus par les rayons dans l'atmosphère, pour les hauteurs plus basses et plus grandes du soleil (le chemin pour 9° étant p. ex., d'après la formule de Laplace, trois fois plus grand qu'à 30°), il est désirable qu'en général les limites, dans lesquelles sont effectuées les réductions, ne soient pas trop grandes.

§ 38. *Sur la réduction à la distance moyenne de la terre au soleil.*

Outre la réduction à la hauteur du soleil, il est nécessaire, dans certains cas, de réduire les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire à la distance moyenne de la terre au soleil, afin d'éliminer l'influence des variations de cette distance au cours de l'année. Au lieu de la distance, il est plus commode de se servir du diamètre apparent du soleil (ou bien de sa moitié  $\rho$ ) que contiennent toutes les tables astronomiques. En désignant par  $\alpha$  la valeur moyenne du rayon apparent du soleil, on a, pour la réduction à la distance moyenne, le facteur

$$\left(\frac{\alpha}{\rho}\right)^2 \quad (154)$$

Dans le périhélie, ce facteur est égal à 0.967 et dans l'aphélie à 1.034. Conformément à cela, il faut dans le premier cas diminuer la valeur de l'intensité de 3,3 % et dans le second l'augmenter de 3,4 %. On avait calculé ce facteur pour Varsovie dans les intervalles de cinq jours ; il a été facile d'opérer ensuite la réduction pour chaque jour en particulier. Conformément à ce qui précède, la plus grande réduction tombe vers la fin du mois de décembre (avec le signe —) et vers le commencement du mois de juillet (avec le signe +) ; les valeurs de l'intensité à la fin du mois de mars et au commencement du mois d'octobre restent invariables.

§ 39. *Evaluation empirique des variations de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie, dues à l'influence de l'humidité absolue.*

Les deux réductions précédentes n'épuisent nullement toutes les causes possibles des variations de l'intensité du rayonnement solaire. Si, d'après les matériaux des mesures, on groupe les valeurs de l'intensité trouvées dans divers mois pour les diverses hauteurs du soleil, on voit immédiatement que les valeurs ainsi obtenues dans chaque groupe diffèrent beaucoup entre elles. Il se pose donc cette question : la hauteur du soleil restant la même et les valeurs de l'intensité étant déjà réduites à la distance moyenne de la terre, d'où viennent toutes ces différences ?

La réponse en est que, outre 1° la hauteur du soleil et 2° la distance variable de la terre sur son orbite, une influence très importante doit être attribuée à 3° la quantité variable de la vapeur d'eau <sup>(1)</sup> dans l'atmosphère et 4° à toute la série des facteurs, pour la plupart accidentels et variables, comme la transparence de l'atmosphère, la poussière, la fumée etc., etc.

Il importe de remarquer que les divers gaz contenus dans l'atmosphère et surtout l'acide carbonique peuvent aussi influencer la radiation solaire. Cependant leur influence est de caractère accidentel ; quant à l'absorption due à l'acide carbonique, elle paraît s'accomplir déjà à des altitudes considérables. D'après les résultats trouvés par M. Ångström <sup>(2)</sup>

---

<sup>(1)</sup> «The chief absorbent of the Earth's atmosphere is water-vapor» dit (p. 79) M. Frank W. Very dans son important travail, intitulé «Atmospheric Radiation: a research conducted at the Allegheny Observatory and at Providence, R. J.» (Washington, Weather Bureau, 1900).

<sup>(2)</sup> Voir aussi le mémoire de M. C.G. Abbot «Recent studies on the solar constant of radiation» (Monthly Weather Review, pp. 587-592, 1903) et les travaux de M. F. Very.

[«Ueber die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre» dans Ann. d. Phys. 1900 et «Einige Bemerkungen zur Absorption der Erdstrahlung durch die atmosphärische Kohlensäure» dans Ofversigt af Vetenskaps-Akademiens Förhandlingar, 1901], il paraît que l'influence de l'acide carbonique, ainsi que ses éventuels changements périodiques peuvent être négligés en ce qui concerne la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire dans un endroit donné.

Pour éliminer, le plus possible, l'influence de tous les facteurs mentionnés sub 4° et arriver à une évaluation empirique des variations de l'intensité du rayonnement dues à l'influence d'un facteur d'une si haute importance tel que la vapeur d'eau, on s'est servi, comme point de départ, de la méthode suivante. On a admis notamment, comme règle générale, que :

les facteurs appartenant à la catégorie mentionnée sub 4° tendent toujours à diminuer, jamais à augmenter les valeurs de la radiation solaire ; or, les réductions à la hauteur et à la distance moyenne étant accomplies, il faut prendre toujours, parmi les données qui restent, les valeurs les plus élevées.

Il est bien entendu que les variations de l'intensité et celles de la vapeur d'eau sont en raison inverse.

De cette manière — en nous appuyant sur les tables (in extenso) des mesures actinométriques et en conservant seulement, après la réduction à la hauteur commune de 30° et à la distance moyenne, les valeurs les plus élevées — on obtient les variations suivantes de  $Q$  avec l'humidité absolue  $f$ .

(Voir Tab. IX, p. 116)

Table IX. — *Variations de l'intensité du rayonnement solaire avec l'humidité absolue, d'après les mesures de Varsovie.*

| Date        | $f$<br>mm. | $Q$<br>(30°; dist.<br>moy.) | $\Delta Q$<br>(à<br>1 mm.) | Date         | $f$<br>mm. | $Q$<br>(30°; dist.<br>moy.) | $\Delta Q$<br>(à<br>1 mm.) |
|-------------|------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|------------|-----------------------------|----------------------------|
| A) 1901     |            |                             |                            | B) 1902-1905 |            |                             |                            |
| 12. II. 01  | 1.8        | 1.280                       | 0.018                      | 20. IX. 02   | 4.0        | 1.270                       | 0.025                      |
| 30. XII. »  | 7.4        | 1.182                       | 0.013                      | 20. IX. 05   | 6.0        | 1.219                       | 0.025                      |
| 11. VIII. » | 11.2       | 1.119                       | 0.017                      | 18. VII. »   | 9.4        | 1.134                       | 0.028                      |
| 3. VI. »    | 16.4       | 1.048                       |                            | 4. VIII. »   | 14.7       | 0.986                       |                            |

Les matériaux des mesures de 1901, renfermant environ la moitié du nombre total des observations, sont présentés séparément. Quant à la période 1902-1905, remarquons que les années 1903 et 1904 y manquent; ce fait s'explique par une grande dépression dans les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire, constatée à cette époque non seulement à Varsovie, mais dans beaucoup d'autres endroits en Europe, ainsi qu'en Amérique. Nous en parlerons plus loin, en discutant la marche annuelle de la radiation solaire. Ajoutons que la même méthode, appliquée aux résultats des mesures pyrhéliométriques de l'année 1905 à Varsovie, conduit aux nombres du même ordre que les précédentes.

Ainsi les données pyrhéliométriques des mois de mai et de juin 1905 donnent pour les variations de  $Q$  ( $\Delta Q$  à 1 mm.) les nombres: 0.016, 0.015 et 0.020, quand l'humidité absolue varie dans les limites de 5,9 mm. à 13,6 mm.

Toutes ces données semblent donc conduire à ce résultat que, quand l'humidité absolue augmente de 1 mm., les

valeurs correspondantes de l'intensité du rayonnement solaire diminuent environ de

0,02 gr. cal.

Ce nombre doit être évidemment considéré comme approximatif et comme représentant une valeur moyenne, parce qu'il n'est pas démontré que les variations de l'intensité sous l'influence de la vapeur d'eau doivent être les mêmes dans tous les intervalles. Le point faible de cette méthode des valeurs les plus élevées consiste aussi en ce qu'elle exige, en général, des matériaux considérables et aussi, peut-être, une précision plus grande dans l'évaluation des valeurs particulières de l'intensité et de l'humidité absolue, par rapport à celle qu'on peut réaliser dans les conditions habituelles des mesures courantes.

De même, il est clair que pour établir l'influence de l'humidité, il faudrait, à vrai dire, prendre en considération l'état et la distribution de la vapeur d'eau dans toute la masse atmosphérique, traversée par les rayons solaires, et non se borner aux couches environnant l'appareil, auxquelles on est généralement obligé de se limiter. Une méthode plus rationnelle pour l'évaluation des coefficients (pour les différentes régions du spectre) consisterait dans les recherches de laboratoire avec des atmosphères artificiellement remplies de quantités variables de vapeur d'eau.

§ 40. *Sur les variations de l'intensité du rayonnement solaire avec l'humidité absolue, d'après les mesures faites à Treurenberg (Spitzberg).*

Pour compléter les quelques données obtenues à Varsovie, sur les variations des valeurs de l'intensité avec l'humidité absolue, examinons, dans ce même but, les matériaux des

mesures pyrhéliométriques, recueillis par M. Westman à Treurenberg en 1899/1900 et publiés dans les «Missions scientifiques pour la mesure d'un arc de méridien au Spitzberg» (T. II, viii<sup>e</sup> section. B. Stockholm. 1903).

Avant de déduire ces variations, nous tenons à faire la remarque suivante. La méthode des «valeurs moyennes», si connue et habituellement employée en météorologie, pourrait paraître, dans notre cas, sinon plus rationnelle, au moins aussi justifiée que la méthode des valeurs les plus élevées, appliquée au § 39 pour les mesures de Varsovie. Il s'agirait, dans notre cas, de réduire toutes les valeurs de  $Q$  à une hauteur et à une distance communes, de diviser les nombres ainsi obtenus en groupes, d'après les valeurs de l'humidité absolue, et d'en former les moyennes. Les différences entre les moyennes des groupes consécutifs donneraient les variations correspondantes de l'intensité du rayonnement et de l'humidité absolue.

Or, le calcul montre que cette méthode des valeurs moyennes donne, dans notre cas, des résultats encore moins satisfaisants que la méthode précédente des valeurs les plus élevées. Les calculs pour Treurenberg et pour Varsovie donnent des résultats également non satisfaisants.

Appliquons, pour Treurenberg, la méthode des valeurs les plus élevées. En divisant les matériaux, recueillis par M. Westman, en deux périodes : 1899 et 1900 et en excluant de celles-ci les jours qui présentent des réductions incertaines, on obtient :

(Voir Tab. X, p. 119)

Nous voyons par là que les variations de  $Q$ , obtenues pour Treurenberg, présentent des valeurs de même ordre que celles qui ont été trouvées précédemment à Varsovie, bien que le coefficient semble être un peu plus grand pour les endroits

Table X. — *Variations de l'intensité du rayonnement solaire avec l'humidité absolue, à Treurenberg.*

| Date   | $f$<br>mm. | $Q$<br>(30°; dist.<br>moy.) | $\Delta Q$<br>(à<br>1 mm.) | Date    | $f$<br>mm. | $Q$<br>(30°; dist.<br>moy.) | $\Delta Q$<br>(à<br>1 mm.) |
|--------|------------|-----------------------------|----------------------------|---------|------------|-----------------------------|----------------------------|
| A) 899 |            |                             |                            | B) 1900 |            |                             |                            |
| 5. IX  | 4.2        | 1.360                       | 0.026                      | 3. VII  | 3.0        | 1.313                       | 0.026                      |
| 10. IX | 5.0        | 1.339                       |                            | 15. VI  | 4.3        | 1.279                       | 0.017                      |
|        |            |                             |                            | 19. VII | 4.6        | 1.274                       |                            |

polaires que pour les latitudes de la Pologne. Nous nous bornons, dans notre discussion, à la constatation de ce fait ; car il s'agissait pour nous d'obtenir une orientation approximative sur le degré d'influence de l'humidité absolue sur les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire. Nous ne saurions cependant trop insister sur le caractère provisoire de ce coefficient qui soulève de nombreuses objections théoriques ; celles-ci ont été déjà en partie mentionnées à la fin du § 39.

La question de l'influence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère sur le rayonnement solaire demanderait à être posée avec plus de précision et résolue par des recherches spéciales.

Remarquons que dans le chapitre suivant, consacré à la marche annuelle de la radiation, la connaissance de la valeur du coefficient de l'intensité, par rapport à l'humidité, n'est pas nécessaire, ce dernier ne figurant pas dans les tables mensuelles.

**NOTE HISTORIQUE.** — L'influence de la vapeur d'eau sur les valeurs du rayonnement solaire a, depuis longtemps, attiré l'attention des savants ; les premières recherches qualitatives ont été faites par M. Tyndall, lequel, dans son travail connu «*Heat as a Mode of Motion*», a insisté sur la forte absorption du

rayonnement par la vapeur d'eau. D'ailleurs, les déterminations numériques données par M. Tyndall ainsi que par d'autres savants (Soret, Magnus, Hoorweg, Buff, Neumayer, Strachey, Park Harrison, Desains et Branly, Exner et Röntgen, etc.) n'ont pas conduit à des résultats définitifs. De même, dans les travaux de MM. Violle, Bartoli et Stracciati, Lecher et Pernter, Crova et K. Ångström, on trouve, à plusieurs reprises, les évaluations approximatives de l'absorption, produite par la vapeur d'eau, dans les différentes couches atmosphériques, sur les valeurs de la radiation solaire.

Les recherches spectrométriques dans cette direction ont été faites par MM. Paschen, Abney et Festing, Rubens et Aschkinass et surtout par S. Langley et par F. Very. Dans le travail publié par M. F. Very en 1900, sous le titre «Atmospheric Radiation», on trouvera la littérature de la question et un exposé critique des anciennes recherches. M. J. Very a effectué de nombreuses mesures spectrobolométriques en vue d'étudier l'influence des divers facteurs et en particulier de la vapeur d'eau sur la radiation atmosphérique. Il nous est impossible d'énumérer ici les résultats de ces longues et précises mesures.

Quant à la question (examinée sommairement au § 39) des variations dans les valeurs intégrales du rayonnement solaire dépendant des changements dans la quantité de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, on ne trouve dans la littérature que des indications peu précises et, en partie, contradictoires. Depuis les travaux de M. J. Violle, on a attribué, dans l'évaluation de l'absorption subie par le rayonnement solaire sous l'action de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, le rôle dominant à la tension de la vapeur (humidité abs.), en écartant l'état hygrométrique. Très affirmatifs, à ce point de vue, étaient surtout MM. A. Bartoli et E. Stracciati (voir Bull. mens. dell' Accademia Gioenia di Scienze Naturali in Catania, fasc. VII, maggio 1889 et Rendiconti del r. Ist. Lomb. di sc. e lett., ser. II, vol. XXVIII, Milano, 1895); dans leur dernier travail de 1895, ils ont formulé la conclusion suivante :

«Le nostre misure fatte sullo Stelvio a 2850 m. di altitudine confermano pienamente quanto avevamo già trovato sugli Appennini Toscani e sull' Etna, cioè che la quantità di radiazioni solari trasmessa attraverso l'atmosfera con eguale altezza di sole (e coeteris paribus) dipende principalmente dalla tensione del vapore acqueo esistente nell'atmosfera (e non già dallo stato igrometrico)».

D'autre part, dans les travaux récents on attribue aussi à l'état hygrométrique une certaine influence dans l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau. Dans le mémoire de M. F. Very «The solar constant» (Monthly Weather Review, August, 1901, Washington), celui-ci parle (p. 365) de la façon suivante à propos de l'absorption en question :

« $W$  = absorption of total solar radiation by aqueous vapor, which is found to be dependent both on the absolute and the relative humidity, the absorbent power of a given quantity of moisture increasing as its state approaches that of saturation».

En même temps, M. F. Very cite une formule pour  $W$  en fonction de  $f$  (tension de la vapeur d'eau) et  $h$  (fraction exprimant l'état hygrométrique). La relation entre  $W$  et les valeurs de  $f$  et de  $h$  est donnée en fonction du facteur

$$\log (1 + fh)^y$$

L'exposant  $y$  aurait la valeur 1,65, quand  $f$  est donné en mm.

Pour les valeurs du produit  $fh = 0,1, 0,5, 10,0$  et  $25,0$ , M. F. Very cite les valeurs numériques suivantes :  $W = 0,1159, 0,1680, 0,4287$  et  $0,4984$ . De ces données, il s'ensuivrait que les valeurs de l'absorption croissent d'autant moins vite que l'humidité devient plus grande.

---

## CHAPITRE HUITIÈME

Sur les valeurs diurnes, mensuelles et annuelles  
du rayonnement solaire à Varsovie, pendant la  
période 1901-1905.

§ 41. *Sur les valeurs les plus élevées et sur la formation des  
valeurs diurnes de l'intensité du rayonnement.*

En abordant la question de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement, il nous faut tout d'abord établir une convention sur la formation des valeurs diurnes et des moyennes mensuelles. Le caractère même de la radiation implique déjà cette idée que les méthodes des moyennes, habituellement employées pour les éléments météorologiques, ne sont pas ici directement applicables.

Tout d'abord, qu'entend-on par valeur diurne de l'intensité du rayonnement solaire? La formation de la moyenne, d'après les mesures effectuées dans les heures rapprochées de midi, ne nous semble pas pouvoir être suffisamment déterminée, le caractère des variations de la radiation pendant ces heures étant différent dans les diverses périodes de l'année et présentant fréquemment des particularités par trop individuelles. D'autre part, considérer comme valeurs diurnes les données obtenues dans un temps déterminé (p. ex. à midi de chaque jour de mesures) présente ce grand inconvénient que 1° le nombre considérable des jours, dans lesquels les

mesures n'ont pas pu être effectuées au temps indiqué, ne figurerait pas dans la marche annuelle, et 2° en cas de dépression de l'intensité à midi ou d'autres perturbations dans la marche diurne, la valeur diurne de la radiation solaire présenterait souvent des valeurs trop basses par rapport à celles qui résulteraient de l'ensemble des mesures effectuées pendant le jour donné.

Il nous a donc semblé utile de prendre un point de départ différent dans la question qui nous occupe. Nous avons déjà précédemment remarqué que tous les facteurs qui influencent la radiation, pendant sa traversée dans les couches atmosphériques, ont une tendance nettement accentuée et définie ; ils tendent toujours à diminuer, jamais à augmenter cette quantité de l'énergie rayonnante qui se propage vers la surface de la terre. La plus grande absorption est exercée par les couches inférieures de l'atmosphère terrestre, mais les couches supérieures en ont aussi leur part. Nous arrivons donc bien près de cette conclusion que, parmi les valeurs mesurées dans un jour donné, ce sont toujours les valeurs les plus élevées qui sont les plus caractéristiques.

Cette règle des valeurs les plus élevées se montre particulièrement féconde dans les discussions actinométriques et nous en avons déjà fait usage une fois ; appliquée à la question des valeurs diurnes de l'intensité, elle nous conduit à cette conclusion que, parmi les valeurs mesurées, c'est la valeur la plus grande qui doit être prise comme valeur diurne pour un jour donné. Si cette intensité-maximum de la radiation était obtenue à midi, c.-à-d. pour la plus grande hauteur du soleil, c'est elle qui devrait nécessairement être admise comme valeur diurne. Si cette valeur, la plus grande, correspond à une autre heure ou plutôt à une autre, que celle de midi, hauteur du soleil, elle devrait être considérée comme caractéristique ; en la réduisant au midi du jour donné, au

moyen des réductions à la hauteur du soleil pour chaque endroit, on obtient définitivement la valeur diurne de la radiation solaire.

Il est bien entendu que dans le choix des mesures correspondantes et dans la réduction à la hauteur de midi, il ne faut pas négliger la remarque importante que nous avons signalée à la fin du § 37. Cette remarque se rapporte aux intervalles qu'il serait inopportun de dépasser, sans porter atteinte à la précision des valeurs réduites : ainsi p. ex. la formation des valeurs diurnes, d'après les mesures effectuées au lever ou au coucher du soleil, conduirait, en général, à des valeurs relativement peu certaines. D'autre part, on peut remarquer que dans ce choix des valeurs les plus grandes parmi des mesures d'un jour donné, il ne s'agit pas évidemment des nombres maxima dans le sens arithmétique de ce mot, mais les valeurs les plus grandes après leur réduction à la même hauteur du soleil.

Cette méthode de formation des valeurs diurnes peut donner lieu à cette objection qu'elle exigerait des mesures constantes du lever au coucher du soleil, ou au moins des mesures consécutives aux heures précédant et suivant midi, car on ne peut être jamais sûr de la non-existence d'une dépression se produisant justement dans la période des mesures. Cette remarque n'est pas évidemment sans raison, mais les mesures effectuées trop loin de midi ne sauront exercer — conformément à la remarque du § 37 — d'influence sur la formation des valeurs diurnes. D'un autre côté, dans les conditions habituelles des mesures de la radiation solaire, la majeure partie des valeurs mesurées se groupent près de midi (p. ex. entre  $11^{\text{h}}\alpha$  et  $1^{\text{h}}\rho$ ) de manière que, en déduisant la valeur diurne d'après les observations faites dans ce temps, on obtient des valeurs qui, en général, ne diffèrent que peu des valeurs justes. Pour éviter complètement les erreurs en

question, il faudrait avoir recours aux appareils enregistreurs pour la radiation solaire, dont cependant la construction n'a pas encore atteint le degré nécessaire de précision pour les mesures courantes.

§ 42. *Sur la formation des moyennes mensuelles.*

Comme pour les autres éléments météorologiques, il est utile et commode de se servir des moyennes mensuelles pour faciliter l'étude des variations de l'intensité du rayonnement solaire au cours de l'année. Il va sans dire que ces moyennes ont pour but principal de donner une orientation générale; elles n'ont un droit d'existence qu'autant qu'elles facilitent la déduction des conclusions ultérieures.

Avant chaque «consolidation» d'un certain groupe de nombres de la période donnée en un, dit moyenne, il faut s'assurer que toutes les valeurs, qui entrent dans la formation des moyennes, ont été obtenues d'après une échelle commune et qu'elles sont, par conséquent, comparables entre elles. Nous ne nous arrêterons pas aux autres remarques qui s'imposent à propos de cette méthode des moyennes dominant presque sans restriction dans la climatologie, ces remarques ne présentant pas des applications plus directes pour la radiation solaire; disons seulement que le point essentiel consiste dans une juste limitation des valeurs moyennes par rapport aux valeurs les plus fréquentes et les plus probables.

Quand il s'agit de la formation des moyennes mensuelles de l'intensité du rayonnement solaire, il s'élève une difficulté particulière consistant en ce que les mesures actinométriques et pyrhéliométriques ne peuvent être effectuées que dans les jours suffisamment clairs et dans les diverses heures de la journée selon l'état de l'atmosphère. On ne peut donc pas

former les moyennes d'après les mesures de tous les jours dans des temps déterminés, comme cela est possible p. ex. pour la température. Pour les moyennes de la radiation solaire on ne peut prendre les moyennes que des jours d'observation, avec ce complément cependant que le nombre de ces jours sera considéré en même temps comme leur « poids ».

Nous avons remarqué plus haut que dans la formation des moyennes il est essentiel que toutes les données particulières soient comparables entre elles ; dans notre cas, cela signifie que toutes les valeurs, entrant dans les moyennes mensuelles de l'intensité du rayonnement solaire, sont réduites d'abord à la hauteur commune du soleil. Donc, en prenant comme point de départ, pour chaque jour du mois donné, la valeur la plus élevée de l'intensité, on la réduira à la hauteur commune, pour laquelle on prendra chaque fois la hauteur du milieu du mois considéré.

Ces dernières hauteurs, en degrés entiers, pour les trois endroits qui nous intéressent le plus ici, sont les suivantes :

|                  | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Zakopane . . .   | 20° | 28° | 39° | 50° | 59° | 64° | 62° | 54°  | 44° | 32° | 23° | 18° |
| Varsovie . . .   | 17° | 25° | 36° | 47° | 56° | 61° | 59° | 51°  | 41° | 29° | 20° | 15° |
| Treurenberg. — — | 8°  | 20° | 28° | 33° | 31° | 23° | 13° | —    | —   | —   | —   | —   |

Le défaut de données pour quelques mois à Treurenberg s'explique par ce fait que, dans ce lieu polaire, le soleil disparaît pendant ce temps, entièrement ou partiellement, sous l'horizon.

A côté de la hauteur commune, la distance variable de la terre présente aussi une certaine influence. On a cependant négligé cette influence en ce qui concerne la formation des moyennes mensuelles ; étant donné que les réductions à la distance (qui peuvent atteindre au maximum 3,4 pour cent) croissent ou décroissent assez régulièrement dans des limites

étroites au cours d'un mois, on ne porte que peu d'atteinte à la comparabilité des moyennes mensuelles, en les rapportant à la distance du milieu de chaque mois. Au contraire, ce facteur a été pris en considération, dans les tables annuelles, pour les comparaisons des moyennes mensuelles entre elles.

Comme exemple de tables servant pour les calculs des moyennes mensuelles, citons les mesures pyréliométriques effectuées pendant les mois d'août et de septembre 1903, à Zakopane, par M. Witkowski.

Table XI. — *Tables mensuelles. Zakopane 1903.*

| Août 1903                     |                     |           |                       |                    | Septembre 1903                |                     |           |                       |                    |
|-------------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|--------------------|
| Date                          | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>soleil | Q<br>réd.<br>à 54° | Date                          | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>soleil | Q<br>réd.<br>à 44° |
| 11. VIII                      | 8.9                 | 1.21      | 54° 8                 | 1.207              | 1. IX                         | 7.0                 | 1.180     | 45° 6                 | 1.119              |
| 12. "                         | 9.4                 | 1.16      | 54.3                  | 1.308              | 2. "                          | 5.0                 | 1.342     | 47.5                  | 1.218              |
| 14. "                         | 9.5                 | 1.07      | 54.6                  | 1.068              | 3. "                          | 5.9                 | 1.203     | 37.9                  | 1.256              |
| 15. "                         | 8.7                 | 1.182     | 48.8                  | 1.207              | 4. "                          | 8.2                 | 1.200     | 43.5                  | 1.201              |
| 17. "                         | 6.0                 | 1.138     | 48.4                  | 1.166              | 5. "                          | 8.5                 | 1.129     | 33.7                  | 1.227              |
| 18. "                         | 7.7                 | 1.161     | 49.8                  | 1.180              | 6. "                          | 9.6                 | 1.160     | 46.1                  | 1.143              |
| 21. "                         | 6.8                 | 1.210     | 52.4                  | 1.216              | 8. "                          | 8.1                 | 1.126     | 46.1                  | 1.111              |
| 22. "                         | 12.5                | 1.119     | 44.8                  | 1.170              | 23. "                         | 5.2                 | 0.943     | 23.9                  | 1.184              |
| 23. "                         | 11.3                | 1.189     | 47.7                  | 1.221              | 24. "                         | 6.4                 | 1.103     | 31.0                  | 1.235              |
| 24. "                         | 9.7                 | 1.008     | 37.3                  | 1.124              | 25. "                         | 4.6                 | 1.108     | 31.5                  | 1.233              |
| 25. "                         | 11.0                | 1.004     | 48.8                  | 1.026              | 26. "                         | 5.6                 | 1.150     | 34.9                  | 1.234              |
| 28. "                         | 8.2                 | 1.020     | 38.4                  | 1.125              | 29. IX                        | 7.4                 | 1.079     | 35.8                  | 1.153              |
| 30. "                         | 6.9                 | 1.098     | 49.7                  | 1.118              |                               |                     |           |                       |                    |
| 31. VIII                      | 5.5                 | 1.138     | 35.5                  | 1.272              |                               |                     |           |                       |                    |
| Moy.                          | 8.7                 | —         | —                     | 1.172              | Moy.                          | 6.8                 | —         | —                     | 1.147              |
| Nombre de jours d'observ. 14. |                     |           |                       |                    | Nombre de jours d'observ. 12. |                     |           |                       |                    |

Quant à cette table, remarquons que les valeurs de l'humidité absolue furent prises d'après les observations de la Station Météorologique de Zakopane et que les valeurs de «Q. obs.» ont été choisies d'après la règle exposée au § 41 ; enfin, les réductions à la hauteur du soleil du milieu du mois, à Zakopane, ont été déjà indiquées au § 36.

§ 43. *Tables mensuelles des mesures actinométriques de Varsovie, pour la période 1901-1905.*

Nous avons présenté les tables mensuelles, pour chaque mois de la période 1901-1905, d'après les mesures actinométriques de Varsovie d'une manière identique à celle de Zakopane. Cinq tables, dressées séparément pour chaque année, se trouvent dans les pages suivantes :

Voir Tab. XII pour l'année 1901, p. 129 ; année 1902, p. 130 ; année 1903, p. 130 ; année 1904, p. 131 ; année 1905, p. 132.

Quant aux colonnes particulières de ces tables, remarquons que les valeurs «*Q. obs.*» ont été choisies d'après la règle exposée au § 41 ; ces valeurs sont accompagnées des données correspondantes de la hauteur du soleil (*h*) et de l'humidité absolue (*f*) en mm. La dernière colonne «*Q. réd.*» se rapporte aux valeurs de «*Q. obs.*», mais déjà réduites à la hauteur commune du milieu du mois correspondant ; ces dernières hauteurs sont indiquées (entre parenthèses) en tête de chaque mois.

Quant à l'humidité absolue, remarquons que les valeurs de 1901 ont été déduites d'après les indications corrigées de l'hygrographe Richard ; dans les années suivantes, 1902-1905, on s'est servi des observations du psychromètre aspirateur d'Assmann, faites à termes fixes (*7<sup>h</sup>a*, *1<sup>h</sup>p*, *9<sup>h</sup>p*, d'après le temps moyen local) à la Station Centrale Météorologique de Varsovie. Indépendamment de cela, on a fait (surtout en 1904 et 1905) les observations directes de l'humidité, avec le même psychromètre, pendant les mesures actinométriques et pyréliométriques. Pour les jours, dans lesquels manquent

Table XII.— *Tables mensuelles des mesures actinométriques*

Varsovie. — Année 1901

| Date   | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd. | Date    | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd. |
|--------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
|        |                     |           |                     | (47°)     |         |                     |           |                     | (59°)     |
| 13. I  | 3.6                 | 0.704     | 14°9                | 0.755     | 2. VII  | 8.7                 | 1.103     | 41°0                | 1.194     |
| 23. I  | 4.7                 | 0.737     | 15.9                | 0.783     | 4. I    | 8.2                 | 1.245     | 52.0                | 1.269     |
| 27. I  | 3.9                 | 0.910     | 18.4                | 0.881     | 6. I    | 10.0                | 1.189     | 56.8                | 1.196     |
| 31. I  | 3.5                 | 0.864     | 17.2                | 0.859     | 7. I    | 10.6                | 1.048     | 48.2                | 1.092     |
|        |                     |           |                     | (25°)     | 10. I   | 9.5                 | 1.180     | 59.2                | 1.180     |
| 1. II  | 3.6                 | 1.027     | 20°5                | 1.101     | 11. I   | 11.0                | 1.163     | 50.9                | 1.192     |
| 10. I  | 2.9                 | 1.114     | 22.9                | 1.147     | 13. I   | 12.5                | 1.156     | 59.7                | 1.154     |
| 12. I  | 1.8                 | 1.214     | 23.2                | 1.242     | 14. I   | 12.4                | 1.189     | 45.6                | 1.248     |
| 13. I  | 2.0                 | 1.167     | 24.4                | 1.180     | 16. I   | 13.9                | 1.198     | 55.3                | 1.209     |
| 14. I  | 1.5                 | 0.974     | 22.0                | 1.022     | 20. I   | 14.8                | 1.132     | 52.5                | 1.134     |
| 17. I  | 1.6                 | 1.108     | 25.6                | 1.099     | 21. I   | 11.8                | 1.142     | 55.4                | 1.154     |
|        |                     |           |                     | (36°)     | 22. I   | 12.4                | 1.204     | 57.7                | 1.208     |
| 2. III | 5.3                 | 1.035     | 28°4                | 1.122     | 4. VIII | 13.6                | 0.948     | 32°9                | 1.051     |
| 15. I  | 8.1                 | 0.863     | 22.2                | 1.044     | 2. I    | 11.2                | 1.031     | 55.5                | 1.042     |
| 23. I  | 4.2                 | 1.128     | 39.4                | 1.100     | 4. I    | 15.2                | 1.104     | 52.9                | 1.095     |
| 28. I  | 2.8                 | 1.042     | 39.7                | 1.011     | 5. I    | 10.4                | 1.058     | 52.0                | 1.053     |
| 31. I  | 3.7                 | 1.180     | 41.1                | 1.139     | 9. I    | 12.0                | 0.738     | 49.5                | 1.069     |
|        |                     |           |                     | (47°)     | 10. I   | 10.2                | 1.219     | 52.5                | 1.212     |
| 1. IV  | 5.3                 | 1.177     | 42°0                | 1.210     | 11. I   | 12.2                | 1.090     | 29.9                | 1.259     |
| 3. I   | 4.8                 | 1.231     | 42.9                | 1.258     | 26. I   | 11.5                | 1.165     | 44.4                | 1.205     |
| 8. I   | 4.6                 | 1.301     | 44.0                | 1.320     |         |                     |           |                     | (41°)     |
| 22. I  | 4.6                 | 1.193     | 46.0                | 1.201     | 4. IX   | 6.8                 | 1.080     | 34°3                | 1.136     |
| 24. I  | 5.1                 | 1.195     | 43.4                | 1.220     | 11. I   | 7.2                 | 1.191     | 44.7                | 1.186     |
| 28. I  | 6.9                 | 1.206     | 51.8                | 1.180     | 21. I   | 11.3                | 1.097     | 35.5                | 1.052     |
| 29. I  | 8.8                 | 1.214     | 51.2                | 1.188     | 22. I   | 12.1                | 1.073     | 37.8                | 1.098     |
|        |                     |           |                     | (56°)     | 23. I   | 10.7                | 1.085     | 33.6                | 1.149     |
| 1. V   | 7.1                 | 1.128     | 46°6                | 1.172     | 24. I   | 10.6                | 1.101     | 29.7                | 1.211     |
| 2. I   | 7.7                 | 1.237     | 37.5                | 1.346     | 25. I   | 8.2                 | 1.131     | 29.7                | 1.241     |
| 3. I   | 5.3                 | 1.237     | 33.1                | 1.248     | 26. I   | 8.6                 | 1.165     | 36.4                | 1.201     |
| 4. I   | 5.6                 | 1.184     | 48.6                | 1.216     | 27. I   | 10.4                | 1.104     | 35.4                | 1.152     |
| 5. I   | 3.8                 | 1.506     | 52.7                | 1.318     |         |                     |           |                     | (29°)     |
| 7. I   | 7.1                 | 1.088     | 40.1                | 1.176     | 1. X    | 12.7                | 1.025     | 32°2                | 0.985     |
| 9. I   | 9.4                 | 1.223     | 54.9                | 1.226     | 4. I    | 11.5                | 1.030     | 33.6                | 0.974     |
| 10. I  | 10.4                | 1.234     | 50.2                | 1.258     | 16. I   | 8.1                 | 1.144     | 28.7                | 1.145     |
| 11. I  | 7.0                 | 0.956     | 26.4                | 1.198     | 21. I   | 8.3                 | 1.073     | 26.9                | 1.102     |
| 12. I  | 6.6                 | 1.237     | 55.8                | 1.238     | 22. I   | 5.0                 | 1.170     | 26.9                | 1.199     |
| 13. I  | 6.6                 | 1.034     | 34.1                | 1.038     | 29. I   | 6.5                 | 0.976     | 24.0                | 1.048     |
| 14. I  | 8.3                 | 1.104     | 48.3                | 1.138     |         |                     |           |                     | (20°)     |
| 18. I  | 4.7                 | 1.275     | 44.9                | 1.330     | 10. XI  | 4.4                 | 1.058     | 20°5                | 1.049     |
| 24. I  | 8.2                 | 1.126     | 42.2                | 1.200     | 23. I   | 3.4                 | 0.894     | 17.0                | 0.954     |
| 25. I  | 11.7                | 1.040     | 41.2                | 1.094     |         |                     |           |                     | (15°)     |
| 27. I  | 11.6                | 1.152     | 58.5                | 1.144     | 6. XII  | 3.4                 | 0.983     | 15°3                | 0.975     |
|        |                     |           |                     | (61°)     | 21. I   | 6.4                 | 0.872     | 14.2                | 0.895     |
| 2. VI  | 14.7                | 1.112     | 42°9                | 1.196     | 30. I   | 7.4                 | 0.749     | 9.0                 | 0.962     |
| 3. I   | 16.4                | 1.195     | 52.8                | 1.221     |         |                     |           |                     |           |
| 14. I  | 7.1                 | 1.292     | 60.2                | 1.294     |         |                     |           |                     |           |
| 19. I  | 8.9                 | 1.164     | 64.4                | 1.164     |         |                     |           |                     |           |
| 24. I  | 19.0                | 1.093     | 64.0                | 1.093     |         |                     |           |                     |           |
| 25. I  | 18.2                | 1.140     | 59.0                | 1.116     |         |                     |           |                     |           |
| 30. I  | 8.8                 | 1.197     | 56.6                | 1.210     |         |                     |           |                     |           |

Année 1902

| Date       | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.      | Date    | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.      |
|------------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|---------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|
| 22. I      | 3.9                 | 0.818     | 17° 1               | (17°)<br>0.816 | 25. VII | 8.4                 | 1.094     | 56° 8               | (59°)<br>1.101 |
| 25.        | 4.8                 | 0.855     | 16.8                | 0.859          | 26.     | 10.7                | 0.634     | 19.0                | 1.003          |
| 28.        | 3.3                 | 0.802     | 16.9                | 0.804          | 27.     | 12.4                | 1.116     | 53.0                | 1.136          |
|            |                     |           |                     |                | 29.     | 7.2                 | 1.300     | 51.3                | 1.328          |
| 6. II      | 2.9                 | 0.937     | 20° 6               | (25°)<br>1.009 |         |                     |           |                     | (54°)          |
| 11.        | 4.2                 | 0.918     | 21.3                | 0.978          | 1. VIII | 7.5                 | 1.116     | 56° 0               | 1.096          |
| 21.        | 2.4                 | 1.062     | 26.5                | 1.040          | 6.      | 9.7                 | 1.200     | 54.3                | 1.186          |
| 22.        | 2.6                 | 1.167     | 27.3                | 1.134          | 8.      | 11.5                | 1.116     | 54.1                | 1.103          |
| 24.        | 4.1                 | 0.948     | 27.6                | 0.911          | 21.     | 8.6                 | 1.145     | 49.1                | 1.155          |
|            |                     |           |                     |                | 23.     | 6.8                 | 1.261     | 49.5                | 1.269          |
|            |                     |           |                     |                | 27.     | 13.9                | 0.946     | 48.1                | 0.961          |
| 13. III    | 1.7                 | 1.308     | 34° 3               | (36°)<br>1.324 | 29.     | 8.4                 | 0.722     | 18.5                | 1.072          |
| 14.        | 1.4                 | 1.245     | 34.6                | 1.258          | 30.     | 7.6                 | 1.013     | 46.9                | 1.036          |
| 20.        | 8.1                 | 1.005     | 37.3                | 0.994          |         |                     |           |                     |                |
| 22.        | 5.7                 | 1.103     | 37.8                | 1.098          | 4. IX   | 12.4                | 1.054     | 45° 2               | (41°)<br>1.025 |
|            |                     |           |                     |                | 5.      | 12.3                | 1.051     | 44.3                | 1.028          |
| 10. IV     | 3.1                 | 1.183     | 45° 5               | (47°)<br>1.192 | 20.     | 4.0                 | 1.349     | 38.6                | 1.367          |
| 14.        | 6.1                 | 1.183     | 46.5                | 1.186          | 22.     | 3.7                 | 1.282     | 37.9                | 1.306          |
| 20.        | 4.8                 | 1.166     | 45.5                | 1.175          | 26.     | 5.3                 | 1.089     | 36.8                | 1.122          |
| 21.        | 3.7                 | 1.292     | 49.4                | 1.278          | 27.     | 6.2                 | 1.130     | 35.4                | 1.175          |
| 25.        | 4.2                 | 1.097     | 50.3                | 1.078          |         |                     |           |                     |                |
|            |                     |           |                     |                | 1. X    | 4.9                 | 1.189     | 34° 8               | (29°)<br>1.121 |
| 13. V      | 6.7                 | 1.122     | 51° 2               | (56°)<br>1.144 | 5.      | 2.9                 | 1.176     | 33.2                | 1.125          |
| 16.        | 5.1                 | 1.025     | 56.7                | 1.023          | 24.     | 4.5                 | 0.848     | 23.7                | 0.924          |
| 20.        | 6.2                 | 1.143     | 57.4                | 1.139          | 25.     | 5.1                 | 0.737     | 23.4                | 0.819          |
| 24.        | 4.4                 | 1.159     | 57.4                | 1.155          |         |                     |           |                     |                |
| 29.        | 7.4                 | 1.042     | 58.6                | 1.034          |         |                     |           |                     |                |
| 31.        | 8.7                 | 1.108     | 59.6                | 1.097          | 5. XI   | 3.4                 | 0.880     | 19° 9               | (20°)<br>0.882 |
|            |                     |           |                     |                | 7.      | 3.4                 | 0.869     | 19.7                | 0.875          |
| 2. VI      | 8.9                 | 1.042     | 59° 9               | (61°)<br>1.045 | 9.      | 6.1                 | 0.655     | 20.5                | 0.646          |
| 4.         | 8.3                 | 1.174     | 60.1                | 1.177          | 14.     | 3.9                 | 0.709     | 19.7                | 0.715          |
| 17.        | 7.7                 | 1.081     | 51.6                | 1.113          | 17.     | 1.5                 | 0.886     | 18.4                | 0.917          |
| 26.        | 5.4                 | 1.120     | 61.2                | 1.120          | 18.     | 1.7                 | 0.856     | 17.7                | 0.901          |
| 28.        | 7.3                 | 1.036     | 60.9                | 1.120          | 19.     | 1.7                 | 0.907     | 18.2                | 0.942          |
| 29.        | 8.2                 | 1.103     | 59.6                | 1.107          | 22.     | 2.3                 | 0.826     | 17.7                | 0.871          |
| 30.        | 7.1                 | 1.106     | 57.9                | 1.115          |         |                     |           |                     |                |
|            |                     |           |                     |                | 5. XII  | 1.1                 | 0.635     | 12° 8               | (15°)<br>0.701 |
| 4. VII     | 5.9                 | 1.207     | 60° 7               | (59°)<br>1.202 | 8.      | 2.6                 | 0.694     | 14.0                | 0.722          |
| 15.        | 7.1                 | 1.269     | 59.4                | 1.268          | 12.     | 1.8                 | 0.644     | 14.3                | 0.664          |
| 16.        | 5.6                 | 1.195     | 56.5                | 1.203          | 13.     | 1.9                 | 0.607     | 14.4                | 0.623          |
|            |                     |           |                     |                | 14.     | 1.9                 | 0.537     | 13.1                | 0.593          |
| Année 1903 |                     |           |                     |                |         |                     |           |                     |                |
| 14. I      | 1.9                 | 0.701     | 15° 2               | (17°)<br>0.744 | 7. II   | 5.0                 | 0.638     | 21° 1               | (25°)<br>0.701 |
| 17.        | 1.7                 | 0.646     | 14.3                | 0.714          | 10.     | 3.8                 | 0.744     | 21.0                | 0.809          |

Année 1903

| Date   | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.      | Date     | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.        |
|--------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|----------|---------------------|-----------|---------------------|------------------|
| 15 II  | 2.6                 | 0.826     | 24°2                | (25°)<br>0.838 | 28. VII  | 9.3                 | 1.138     | 57°0                | (59°)<br>1.144   |
| 25.    | 3.8                 | 0.869     | 24.4                | 0.820          |          |                     |           |                     |                  |
| 27.    | 4.3                 | 0.891     | 29.2                | 0.831          |          |                     |           |                     |                  |
|        |                     |           |                     | (36°)          | 15. VIII | 11.6                | 0.998     | 51°4                | (51°)<br>0.996   |
| 3 III  | 6.4                 | 0.892     | 28°6                | 0.977          | 22.      | 12.4                | 0.992     | 49.8                | 0.998            |
| 22.    | 5.8                 | 0.912     | 38.0                | 0.895          | 23.      | 12.0                | 0.962     | 49.5                | 0.970            |
| 23.    | 6.6                 | 0.963     | 38.2                | 0.944          |          |                     |           |                     |                  |
| 24.    | 6.1                 | 0.876     | 38.8                | 0.853          | 2. IX    | 8.8                 | 1.007     | 41°4                | (41°)<br>1.004   |
| 26.    | 5.6                 | 0.921     | 39.7                | 0.890          | 3.       | 9.9                 | 1.058     | 45.6                | 1.026            |
| 27.    | 5.8                 | 0.986     | 40.1                | 0.952          | 16.      | 11.6                | 0.980     | 40.7                | 0.982            |
|        |                     |           |                     | (47°)          | 17.      | 12.5                | 0.893     | 39.3                | 0.906            |
| 22. IV | 5.5                 | 1.018     | 49°2                | 1.005          | 18.      | 7.6                 | 0.904     | 40.0                | 0.911            |
|        |                     |           |                     | (56°)          | 19.      | 7.1                 | 1.028     | 39.3                | 1.041            |
| 2. V   | 8.7                 | 0.876     | 53°0                | 0.887          | 22.      | 6.3                 | 0.934     | 38.1                | 0.956            |
| 4.     | 9.5                 | 0.948     | 53.9                | 0.955          | 26.      | 7.3                 | 0.984     | 36.0                | 1.024            |
| 5.     | 7.5                 | 0.963     | 53.6                | 0.972          |          |                     |           |                     |                  |
| 22.    | 4.8                 | 1.004     | 54.1                | 1.011          | 2. X     | 9.0                 | 0.778     | 34°5                | (29°)<br>0.713   |
| 28.    | 8.8                 | 1.002     | 59.1                | 0.993          | 22.      | 3.9                 | 0.930     | 27.1                | 0.957            |
|        |                     |           |                     | (61°)          | 27.      | 8.6                 | 0.951     | 24.4                | 1.017            |
| 1. VI  | 9.1                 | 1.088     | 59°5                | 1.093          | 28.      | 7.6                 | 0.795     | 24.9                | 0.851            |
| 30.    | 9.8                 | 1.185     | 60.4                | 1.187          | 29.      | 6.3                 | 0.848     | 24.6                | 0.911            |
|        |                     |           |                     | (59°)          |          |                     |           |                     |                  |
| 4. VII | 11.8                | 0.912     | 60°5                | 0.907          | XI       | —                   | —         | —                   | —                |
| 13.    | 10.6                | 1.019     | 59.5                | 1.017          | 25. XII  | 2.1                 | (0.460)   | 14°3                | (15°)<br>(0.480) |

Année 1904

|        |     |       |      |                |        |     |       |      |                |
|--------|-----|-------|------|----------------|--------|-----|-------|------|----------------|
| 1. I   | 3.3 | 0.653 | 14°5 | (17°)<br>0.715 | 13. IV | 4.1 | 1.190 | 46°6 | (47°)<br>1.192 |
| 4.     | 2.3 | 0.648 | 14.9 | 0.699          | 18.    | 4.0 | 1.134 | 43.1 | 1.159          |
| 5.     | 2.1 | 0.586 | 15.0 | 0.634          | 24.    | 9.1 | 1.027 | 42.3 | 1.058          |
| 6.     | 1.8 | 0.548 | 15.2 | 0.591          | 29.    | 4.7 | 1.171 | 41.1 | 1.210          |
| 29.    | 2.6 | 0.606 | 19.3 | 0.559          |        |     |       |      |                |
|        |     |       |      | (25°)          | 2. V   | 8.8 | 0.882 | 42°1 | (56°)<br>0.956 |
| 7. II  | 4.6 | 0.644 | 21°8 | 0.695          | 7.     | 5.2 | 1.041 | 52.9 | 1.052          |
| 14.    | 5.0 | 0.592 | 19.2 | 0.691          | 9.     | 7.4 | 1.114 | 54.6 | 1.119          |
| 17.    | 3.8 | 0.697 | 25.1 | 0.695          | 13.    | 4.8 | 1.218 | 46.3 | 1.264          |
| 23.    | 3.6 | 0.946 | 27.0 | 0.917          | 14.    | 4.7 | 1.002 | 44.4 | 1.060          |
|        |     |       |      | (36°)          | 15.    | 5.3 | 1.006 | 55.0 | 1.009          |
| 4. III | 2.8 | 1.207 | 31°3 | 1.256          | 17.    | 6.0 | 1.215 | 56.4 | 1.214          |
| 5.     | 1.7 | 1.185 | 29.9 | 1.252          | 21.    | 4.6 | 1.112 | 53.4 | 1.321          |
| 6.     | 1.6 | 1.155 | 31.0 | 1.208          | 27.    | 5.5 | 1.138 | 43.8 | 1.200          |
| 17.    | 2.4 | 1.130 | 35.9 | 1.132          | 28.    | 5.3 | 1.072 | 58.0 | 1.066          |
| 18.    | 2.8 | 1.138 | 36.2 | 1.136          | 30.    | 7.1 | 1.059 | 39.1 | 1.155          |
| 22.    | 3.0 | 1.106 | 38.0 | 1.089          | 31.    | 5.6 | 1.223 | 59.0 | 1.214          |
| 25.    | 3.2 | 1.150 | 39.5 | 1.121          |        |     |       |      |                |

Année 1904

| Date    | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.      | Date     | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.      |
|---------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|----------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|
| 1. VI   | 6.4                 | 1.033     | 54°3                | (61°)<br>1.054 | 28. VIII | 8.9                 | 1.043     | 47°2                | (51°)<br>1.064 |
| 2.      | 7.0                 | 1.011     | 59.6                | 1.015          | 29.      | 8.7                 | 1.168     | 46.5                | 1.193          |
| 3.      | 10.9                | 0.978     | 59.8                | 0.980          | 30.      | 7.8                 | 1.116     | 42.7                | 1.166          |
| 4.      | 7.6                 | 1.027     | 60.2                | 1.029          |          |                     |           |                     |                |
| 5.      | 4.2                 | 1.110     | 57.1                | 1.122          |          |                     |           |                     | (41°)          |
| 6.      | 6.8                 | 1.027     | 55.8                | 1.043          | 1. IX    | 5.6                 | 1.225     | 45°1                | 1.196          |
| 10.     | 6.4                 | 1.162     | 59.7                | 1.166          | 2.       | 7.5                 | 1.236     | 44.4                | 1.212          |
| 11.     | 7.1                 | 1.044     | 45.8                | 1.105          | 3.       | 7.8                 | 1.018     | 30.1                | 1.123          |
| 12.     | 6.2                 | 1.162     | 55.8                | 1.178          | 6.       | 7.4                 | 1.161     | 41.4                | 1.158          |
| 13.     | 5.1                 | 1.180     | 57.8                | 1.190          | 7.       | 7.6                 | 1.171     | 41.8                | 1.165          |
| 14.     | 5.0                 | 1.135     | 49.7                | 1.177          | 12.      | 7.2                 | 1.098     | 37.1                | 1.128          |
| 15.     | 7.0                 | 0.981     | 39.4                | 1.09           | 13.      | 5.3                 | 1.237     | 40.9                | 1.238          |
| 16.     | 7.0                 | 1.070     | 61.0                | 1.070          | 19.      | 4.0                 | 1.123     | 39.4                | 1.135          |
| 27.     | 8.0                 | 1.081     | 56.9                | 1.093          | 23.      | 6.8                 | 1.116     | 37.3                | 1.145          |
|         |                     |           |                     |                | 26.      | 10.1                | 0.955     | 32.3                | 1.033          |
|         |                     |           |                     | (59°)          | 29.      | 7.1                 | 1.030     | 35.3                | 1.076          |
| 2. VII  | 8.6                 | 1.185     | 53°7                | 1.202          | 30.      | 7.1                 | 1.070     | 33.3                | 1.137          |
| 9.      | 7.8                 | 0.975     | 59.8                | 0.973          |          |                     |           |                     |                |
| 12.     | 6.6                 | 0.946     | 42.4                | 1.027          |          |                     |           |                     | (29°)          |
| 13.     | 5.8                 | 1.312     | 58.5                | 1.313          | 1. X     | 8.8                 | 1.036     | 33°4                | 0.983          |
| 14.     | 7.2                 | 1.215     | 49.6                | 1.251          | 5.       | 7.1                 | 0.924     | 33.0                | 0.875          |
| 15.     | 7.6                 | 1.064     | 46.2                | 1.120          | 17.      | 5.3                 | 0.925     | 28.4                | 0.933          |
| 16.     | 8.9                 | 0.901     | 38.9                | 1.008          | 24.      | 5.5                 | 1.100     | 25.5                | 1.150          |
| 18.     | 8.3                 | 1.024     | 46.5                | 1.078          |          |                     |           |                     |                |
|         |                     |           |                     | (51°)          |          |                     |           |                     | (20°)          |
| 1. VIII | 7.9                 | 1.101     | 45°3                | 1.133          | 11. XI   | 3.7                 | 0.941     | 19°9                | 0.943          |
| 2.      | 8.7                 | 0.986     | 43.8                | 1.028          | 16.      | 2.2                 | 0.983     | 18.8                | 1.006          |
| 17.     | 7.4                 | 1.054     | 40.0                | 1.123          |          |                     |           |                     | (15°)          |
| 18.     | 10.3                | 0.988     | 50.9                | 0.988          | 2. XII   | 2.3                 | 0.726     | 14°2                | 0.748          |
| 27.     | 7.5                 | 1.091     | 39.4                | 1.165          | 28.      | 2.4                 | 0.779     | 14.4                | 0.796          |

Année 1905

|         |     |       |      |                |        |      |       |      |                |
|---------|-----|-------|------|----------------|--------|------|-------|------|----------------|
| 2. I    | 1.0 | 0.625 | 14°7 | (17°)<br>0.681 | 30. IV | 6.6  | 1.059 | 52°1 | (47°)<br>1.032 |
| 3.      | 1.6 | 0.695 | 14.1 | 0.768          |        |      |       |      |                |
| 18.     | 2.3 | 0.932 | 16.8 | 0.937          |        |      |       |      | (56°)          |
| 19.     | 2.0 | 0.901 | 17.1 | 0.899          | 2. V   | 8.1  | 0.815 | 27°3 | 1.040          |
| 21.     | 2.1 | 0.874 | 16.1 | 0.895          | 3.     | 10.8 | 0.963 | 40.0 | 1.052          |
| 22.     | 1.6 | 0.837 | 17.0 | 0.837          | 6.     | 7.8  | 1.114 | 33.0 | 1.266          |
| 24.     | 3.4 | 0.824 | 17.6 | 0.811          | 8.     | 6.1  | 1.164 | 53.1 | 1.175          |
|         |     |       |      |                | 11.    | 6.3  | 1.180 | 44.5 | 1.238          |
|         |     |       |      | (25°)          | 12.    | 7.8  | 1.135 | 54.6 | 1.140          |
| 5. II   | 2.7 | 1.065 | 21°4 | 1.123          | 16.    | 5.5  | 1.194 | 53.6 | 1.203          |
|         |     |       |      |                | 19.    | 11.6 | 1.264 | 57.0 | 1.261          |
|         |     |       |      | (36°)          | 22.    | 5.8  | 1.155 | 55.9 | 1.155          |
| 13. III | 6.0 | 1.116 | 34°6 | 1.129          | 25.    | 4.8  | 1.174 | 48.1 | 1.209          |
| 16.     | 4.1 | 1.094 | 35.6 | 1.098          | 27.    | 6.6  | 1.106 | 40.8 | 1.189          |
|         |     |       |      |                | 29.    | 6.6  | 1.072 | 49.7 | 1.099          |
|         |     |       |      | (47°)          | 30.    | 8.6  | 1.151 | 58.2 | 1.145          |
| 12. IV  | 8.2 | 1.116 | 46°1 | 1.122          | 31.    | 11.0 | 1.146 | 59.2 | 1.136          |
| 24.     | 4.8 | 1.236 | 42.7 | 1.264          |        |      |       |      |                |

Année 1905

| Date    | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.      | Date                | Hum.<br>abs.<br>mm. | Q<br>obs. | Haut.<br>du<br>sol. | Q<br>réd.     |
|---------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------|
| 2. VI   | 10.8                | 1.018     | 37°5                | (61°)<br>1.142 | 16. VIII            | 9.2                 | 1.135     | 50°6                | 51°)<br>1.137 |
| 5.      | 11.5                | 1.005     | 46.7                | 1.065          | 26.                 | 9.7                 | 1.094     | 44.6                | 1.131         |
| 6.      | 12.2                | 1.034     | 48.6                | 1.081          |                     |                     |           |                     | (41°)         |
| 30.     | 13.2                | 2.072     | 60.9                | 1.072          | 5. IX               | 6.6                 | 1.125     | 40.1                | 1.131         |
|         |                     |           |                     | (59°)          | 7.                  | 9.9                 | 1.176     | 39.5                | 1.187         |
| 1. VII  | 14.0                | 0.962     | 43°9                | 1.033          | 12.                 | 13.3                | 1.091     | 38.6                | 1.109         |
| 7.      | 9.5                 | 1.031     | 33.7                | 1.184          | 19.                 | 6.5                 | 1.144     | 36.4                | 1.150         |
| 8.      | 9.0                 | 1.084     | 36.6                | 1.210          | 20.                 | 5.7                 | 1.300     | 38.9                | 1.316         |
| 10.     | 11.1                | 1.108     | 42.8                | 1.186          |                     |                     |           |                     | (29°)         |
| 14.     | 8.6                 | 1.135     | 39.3                | 1.239          | 10. X <sup>1)</sup> | 5.4                 | 1.187     | 31°3                | 1.157         |
| 18.     | 9.4                 | 1.292     | 58.1                | 1.295          |                     |                     |           |                     | (20°)         |
| 27.     | 10.4                | 1.139     | 41.0                | 1.230          | 2. XI               | 6.7                 | 0.930     | 22°8                | 0.881         |
| 28.     | 12.1                | 1.132     | 40.8                | 1.224          | 28.                 | 5.4                 | 0.750     | 16.2                | 0.828         |
|         |                     |           |                     | (54°)          | 29.                 | 4.5                 | 0.792     | 15.4                | 0.890         |
| 1. VIII | 11.3                | 1.018     | 31°0                | 1.173          |                     |                     |           |                     | (15°)         |
| 3.      | 8.9                 | 1.180     | 46.7                | 1.204          | 6. XII              | 4.0                 | 0.813     | 14°6                | 0.825         |
| 4.      | 14.7                | 1.108     | 47.6                | 1.126          | 14.                 | 3.7                 | 0.811     | 14.3                | 0.831         |
| 5.      | 12.7                | 1.065     | 54.3                | 1.050          |                     |                     |           |                     |               |
| 10.     | 9.5                 | 1.160     | 53.5                | 1.149          |                     |                     |           |                     |               |

<sup>1)</sup> La mesure de 10.X a été effectuée au moyen du pyréliomètre de compensation.

les observations directes de l'humidité absolue, on a pris les valeurs interpolées, d'après les observations à termes fixes. Cette interpolation ne peut pas toujours être effectuée avec toute la précision voulue; surtout, les valeurs d'été, ainsi obtenues, peuvent présenter des différences jusqu'à quelques dixièmes de mm., quoiqu'on puisse remarquer que les valeurs diurnes de la radiation se groupent dans la plupart des cas dans les heures peu éloignées de 1<sup>h</sup>p.

#### § 44. *Résumés annuels des mesures de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie.*

Ayant fait, au § 42, la convention concernant la formation des moyennes mensuelles, nous pouvons passer maintenant

aux résumés annuels, afin d'avoir une orientation rapide et commode pour les variations de l'intensité du rayonnement solaire au cours de l'année. Dans la Tab. XIII

(Voir Tab. XIII, p. 135)

nous retrouvons, dans les colonnes successives, séparément pour chaque année de la période 1901-1905 :

- 1) Année et mois (en chiffres romains I-XII) ;
- 2) Moyennes mensuelle  $Q$ , calculées d'après les tables mensuelles (voir Tab. XII), d'après la méthode exposée au § 42 ;
- 3) Hauteur  $h$  du soleil du milieu de chaque mois, à Varsovie ;
- 4) Moyennes mensuelles  $Q$ , réduites à la hauteur de 30 degrés commune pour tous les mois, et à la distance moyenne de la terre ;
- 5) Cette colonne donne les nombres  $n$  des jours d'observation qui ont servi pour la formation des moyennes  $Q$ . Ajoutons que ces nombres furent en même temps considérés comme les « poids » des moyennes mensuelles correspondantes ;
- 6) Dans cette colonne, se trouvent indiquées les moyennes de l'humidité absolue  $f$  en mm. pour les jours d'observation et pour le temps correspondant à la valeur diurne de l'intensité. Ces moyennes, comparées entre elles, ont été prises avec les poids, comme cela a été mentionné déjà plus haut ;
- 7) Dans la dernière colonne sont indiquées les valeurs les plus élevées, parmi les valeurs diurnes de chaque mois, ainsi que leurs dates respectives. Ces maxima se rapportent à la hauteur du milieu du mois correspondant ; ils n'ont pas été réduits à la distance moyenne.

Table XIII. — *Résumés annuels.* Varsovie 1901-1905.

| Année | Mois  | Moyen.<br>mens.<br>Q | h   | Q<br>30°; dist.<br>moy. | n  | f    | Val. max. mens. |      |
|-------|-------|----------------------|-----|-------------------------|----|------|-----------------|------|
|       |       |                      |     |                         |    |      | Max. Q          | Date |
| 1901  | I     | 0.820                | 17° | 1.001                   | 4  | 3.9  | 0.881           | 27   |
|       | II    | 1.132                | 25  | 1.172                   | 6  | 2.2  | 1.242           | 12   |
|       | III   | 1.083                | 36  | 1.010                   | 5  | 4.8  | 1.139           | 31   |
|       | IV    | 1.225                | 47  | 1.089                   | 7  | 5.7  | 1.320           | 8    |
|       | V     | 1.209                | 56  | 1.043                   | 16 | 7.5  | 1.346           | 2    |
|       | VI    | 1.185                | 61  | 1.014                   | 7  | 13.3 | 1.294           | 14   |
|       | VII   | 1.188                | 59  | 1.025                   | 12 | 11.3 | 1.269           | 4    |
|       | VIII  | 1.120                | 51  | 0.978                   | 8  | 12.4 | 1.259           | 11   |
|       | IX    | 1.158                | 41  | 1.058                   | 9  | 9.5  | 1.241           | 25   |
|       | X     | 1.076                | 29  | 1.082                   | 6  | 8.7  | 1.199           | 22   |
|       | XI    | 1.002                | 20  | 1.129                   | 2  | 3.6  | 1.049           | 10   |
|       | XII   | 0.944                | 15  | 1.167                   | 3  | 5.6  | 0.975           | 6    |
|       | Année |                      |     | 1.052                   | 85 | 8.3  |                 |      |
| 1902  | I     | 0.826                | 17° | 1.009                   | 3  | 4.0  | 0.859           | 25   |
|       | II    | 1.014                | 25  | 1.060                   | 5  | 3.2  | 1.134           | 22   |
|       | III   | 1.169                | 36  | 1.093                   | 4  | 4.2  | 1.324           | 13   |
|       | IV    | 1.182                | 47  | 1.046                   | 5  | 4.4  | 1.278           | 21   |
|       | V     | 1.098                | 56  | 0.933                   | 6  | 6.4  | 1.155           | 24   |
|       | VI    | 1.114                | 61  | 0.940                   | 7  | 7.6  | 1.177           | 4    |
|       | VII   | 1.177                | 59  | 1.011                   | 7  | 8.2  | 1.328           | 29   |
|       | VIII  | 1.110                | 51  | 0.965                   | 8  | 9.3  | 1.269           | 23   |
|       | IX    | 1.171                | 41  | 1.071                   | 6  | 7.3  | 1.367           | 20   |
|       | X     | 0.997                | 29  | 1.003                   | 4  | 4.4  | 1.125           | 5    |
|       | XI    | 0.845                | 20  | 0.976                   | 8  | 3.0  | 0.942           | 19   |
|       | XII   | 0.661                | 15  | 0.894                   | 5  | 1.9  | 0.722           | 8    |
|       | Année |                      |     | 0.994                   | 68 | 5.7  |                 |      |
| 1903  | I     | 0.729                | 17° | 0.909                   | 2  | 1.8  | 0.744           | 14   |
|       | II    | 0.800                | 25  | 0.850                   | 5  | 3.9  | 0.838           | 15   |
|       | III   | 0.919                | 36  | 0.819                   | 6  | 6.1  | 0.977           | 3    |
|       | IV    | 1.005                | 47  | 0.869                   | 1  | 5.5  | 1.005           | 22   |
|       | V     | 0.964                | 56  | 0.793                   | .  | 7.9  | 1.011           | 22   |
|       | VI    | 1.140                | 61  | 0.967                   | 2  | 9.5  | 1.187           | 30   |
|       | VII   | 1.023                | 59  | 0.852                   | 3  | 10.6 | 1.144           | 28   |
|       | VIII  | 0.988                | 51  | 0.839                   | 3  | 12.0 | 0.998           | 22   |
|       | IX    | 0.981                | 41  | 0.885                   | 8  | 8.9  | 1.041           | 19   |
|       | X     | 0.890                | 29  | 0.898                   | 5  | 7.1  | 1.017           | 27   |
|       | XI    | "                    | 20  | "                       | "  | "    | "               | "    |
|       | XII   | (0.480)              | 15  | 0.716                   | 1  | 2.1  | "               | "    |
|       | Année |                      |     | 0.862                   | 41 | 7.3  |                 |      |
| 1904  | I     | 0.640                | 17  | 0.825                   | 5  | 2.4  | 0.715           | 1    |
|       | II    | 0.750                | 25  | 0.800                   | 4  | 4.3  | 0.917           | 23   |
|       | III   | 1.171                | 36  | 1.094                   | 7  | 2.5  | 1.256           | 4    |
|       | IV    | 1.153                | 47  | 1.020                   | 4  | 5.5  | 1.210           | 29   |
|       | V     | 1.136                | 56  | 0.975                   | 12 | 5.9  | 1.321           | 21   |
|       | VI    | 1.094                | 61  | 0.919                   | 14 | 6.8  | 1.190           | 13   |
|       | VII   | 1.122                | 59  | 0.956                   | 8  | 7.6  | 1.313           | 13   |
|       | VIII  | 1.108                | 51  | 0.963                   | 8  | 8.4  | 1.193           | 29   |
|       | IX    | 1.146                | 41  | 1.050                   | 12 | 7.0  | 1.238           | 13   |
|       | X     | 0.985                | 29  | 0.993                   | 4  | 6.7  | 1.150           | 24   |
|       | XI    | 0.975                | 20  | 1.104                   | 2  | 3.0  | 1.006           | 16   |
|       | XII   | 0.772                | 15  | 1.003                   | 2  | 2.4  | 0.796           | 28   |
|       | Année |                      |     | 0.968                   | 82 | 5.9  |                 |      |
| 1905  | I     | 0.833                | 17° | 1.014                   | 7  | 2.0  | 0.937           | 18   |
|       | II    | 1.123                | 25  | 1.161                   | 1  | 2.7  | 1.123           | 5    |
|       | III   | 1.111                | 36  | 1.036                   | 2  | 5.1  | 1.129           | 13   |
|       | IV    | 1.139                | 47  | 1.004                   | 3  | 6.5  | 1.264           | 24   |
|       | V     | 1.166                | 56  | 1.000                   | 14 | 7.7  | 1.266           | 6    |
|       | VI    | 1.090                | 61  | 0.915                   | 4  | 12.7 | 1.142           | 2    |
|       | VII   | 1.200                | 59  | 1.036                   | 8  | 10.5 | 1.295           | 18   |
|       | VIII  | 1.139                | 51  | 0.997                   | 7  | 10.9 | 1.204           | 3    |
|       | IX    | 1.179                | 41  | 1.085                   | 5  | 8.4  | 1.316           | 20   |
|       | X     | 1.157                | 29  | 1.130                   | 1  | 5.4  | 1.157           | 10   |
|       | XI    | 0.866                | 20  | 0.997                   | 3  | 5.5  | 0.890           | 29   |
|       | XII   | 0.828                | 15  | 1.056                   | 2  | 3.9  | 0.831           | 14   |
|       | Année |                      |     | 1.016                   | 57 | 8.0  |                 |      |

Quant à la moyenne annuelle de la radiation solaire, on l'a déduite comme la moyenne des données de la colonne 4<sup>m</sup>, c.-à-d. des moyennes mensuelles, réduites à 30° de la hauteur et à la distance moyenne, les nombres de jours d'observation ayant été pris comme poids des valeurs particulières. On a donc appliqué la formule

$$\text{moy. ann. } Q = \frac{\sum_{i=1}^{XII} n_i Q_i}{\sum_{i=1}^{XII} n_i} \quad (155)$$

D'une manière analogue, on a trouvé la moyenne annuelle de l'humidité absolue d'après les moyennes mensuelles et les nombres  $n$  de jours d'observation comme leurs « poids ».

De la Tab. XIII, il résulte que les moyennes annuelles de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie, sont les suivantes:

Table XIV.—*Moyennes annuelles de l'intensité de rayonnement solaire. Varsovie 1901-1905.*

| Année | Moy. ann. Q<br>(30°; dist. moy.)<br>gr. cal. | Nombre<br>de jour<br>d'observ. | Moy. ann.<br>de l'hum. abs.<br>mm. |
|-------|----------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 1901  | 1.052                                        | 85                             | 8.3                                |
| 1902  | 0.994                                        | 68                             | 5.7                                |
| 1903  | 0.862                                        | 41                             | 7.3                                |
| 1904  | 0.968                                        | 82                             | 5.9                                |
| 1905  | 1.016                                        | 57                             | 8.0                                |

Les nombres annuels de jours d'observation serviront, de leur côté, comme poids des moyennes annuelles pour leurs

comparaisons réciproques. Ainsi, la moyenne des cinq années 1901-1905 est égale, à Varsovie à 0.990 gr. cal. (la moyenne correspondante de l'humidité absolue étant 7.0 mm).

§ 45. *Remarque sur la formation des moyennes mensuelles Q, d'après les nombres égaux de jours d'observation.*

Outre la méthode de formation des moyennes mensuelles, exposée au § 42, dans laquelle les moyennes sont calculées d'après tous les jours d'observation dans un mois donné, il peut être utile d'employer encore une autre méthode qui consiste dans la formation des moyennes d'après des nombres égaux (p. ex. cinq) de jours pour tous les mois ; ces jours seront choisis parmi l'ensemble des jours d'observation de telle manière que les valeurs diurnes correspondantes soient successivement les plus élevées.

Dans la Tab. XV, sont données les moyennes mensuelles pour les mois consécutifs de la période 1901-1905, calculées d'après cinq jours d'observation de chaque mois et réduites, comme d'habitude, à la hauteur du soleil du milieu du mois correspondant.

Table XV.— *Moyennes mensuelles d'après cinq jours d'observation. Varsovie 1901-1905*

| Année | I       | II      | III     | IV      | V     | VI      | VII     | VIII    | IX    | X       | XI      | XII     |
|-------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|
| 1901  | [0.820] | 1.154   | 1.083   | 1.242   | 1.300 | 1.217   | 1.226   | 1.168   | 1.199 | 1.096   | —       | [0.944] |
| 1902  | [0.826] | 1.044   | [1.169] | 1.182   | 1.113 | 1.128   | 1.227   | 1.162   | 1.200 | [0.997] | 0.965   | 0.661   |
| 1903  | —       | 0.800   | 0.932   | —       | 0.964 | —       | [1.023] | [0.988] | 1.015 | 0.890   | —       | —       |
| 1904  | 0.640   | [0.750] | 1.197   | [1.155] | 1.243 | 1.167   | 1.193   | 1.156   | 1.194 | [0.985] | —       | —       |
| 1905  | 0.876   | —       | —       | [1.139] | 1.235 | [1.090] | 1.240   | 1.158   | 1.179 | —       | [0.866] | —       |

Lorsque le nombre de jours, dans lesquels on a fait les mesures actinométriques, a été inférieur à cinq, dans un mois donné, on a mis les moyennes correspondantes entre parenthèses ; quand ce nombre a été inférieur à 3, la moyenne correspondante n'a pas été indiquée.

La comparaison des moyennes mensuelles, dans les Tab. XIII et XV, nous montre que les nouvelles moyennes sont plus élevées pour la période de mai à septembre ; ce fait est d'ailleurs naturel, le nombre de jours d'observation dans les autres mois ne dépassant que rarement cinq. L'augmentation de ces nouvelles moyennes mensuelles est de 5 pour cent environ.

En calculant, d'après la méthode exposée au § 44, les moyennes annuelles pour les valeurs mensuelles de la Tab. XV (après leur réduction à 30° et à la distance moyenne), on obtient :

|      |      |           |       |          |     |                |                       |
|------|------|-----------|-------|----------|-----|----------------|-----------------------|
| Pour | 1901 | moy. ann. | 1.084 | gr. cal. | (52 | jours d'obs. ; | f=7.4 <sup>mm</sup> ) |
| »    | 1902 | »         | 1.018 | »        | (56 | »              | » ; f=5.2 » )         |
| »    | 1903 | »         | 0.877 | »        | (31 | »              | » ; f=7.6 » )         |
| »    | 1904 | »         | 1.002 | »        | (47 | »              | » ; f=5.5 » )         |
| »    | 1905 | »         | 1.034 | »        | (35 | »              | » ; f=7.9 » )         |

La nouvelle moyenne annuelle des cinq années à Varsovie serait 1.013 gr. cal., en prenant en considération les nombres respectifs de jours d'observation ; la valeur correspondante de l'humidité absolue ( $f$ ) est égale à 6.6 mm.

---

## CHÂPITRE NEUVIÈME

Sur le résumé annuel moyen pour les cinq années 1901-1905 à Varsovie et sur la marche de la dépression du rayonnement solaire dans cette période.

§ 46. *Sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire, à Varsovie.*

L'examen des résumés annuels <sup>(1)</sup> de Varsovie conduit à cette conclusion que la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire présente à Varsovie trois maxima, à savoir :

*a)* Maximum principal au printemps, entre les mois d'avril et mai.

*b)* Second maximum en été se montrant en juillet.

*c)* Troisième maximum en automne se présentant toujours au mois de septembre.

Quant au minimum, il tombe au mois de décembre ou de janvier, quoique les diminutions dans les valeurs mensuelles se constatent aussi aux mois de juin et d'août, avant les maxima d'été et d'automne.

---

<sup>(1)</sup> Voir les courbes des variations mensuelles à la fin de cet ouvrage (Pl. 2).

Ces résultats, visibles directement dans chaque résumé annuel, malgré les différences individuelles de chaque année, s'accroissent mieux encore, si l'on forme les moyennes pour toute la période 1901-1905, d'après les données de la Tab. XIII.

Ces moyennes des cinq années 1901-1905, pour les mois consécutifs (désignés en chiffres romains), sont les suivantes :

|       |       |      |       |        |       |       |       |
|-------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| I..   | 0.774 | IV.. | 1.176 | VII..  | 1.162 | X..   | 1.000 |
| II..  | 0.954 | V..  | 1.145 | VIII.. | 1.107 | XI..  | 0.887 |
| III.. | 1.085 | VI.. | 1.119 | IX..   | 1.124 | XII.. | 0.755 |

Il faut remarquer aussitôt que les valeurs des moyennes mensuelles, ainsi obtenues, ne peuvent être considérées comme moyennes « normales » pour Varsovie et cela à cause d'une forte dépression de l'intensité du rayonnement qui s'est accentuée au milieu de cette période 1901-1905. Nous allons en parler dans le paragraphe suivant.

Si l'on compare les valeurs des moyennes mensuelles, prises *caeteris paribus*, c.-à.-d. réduites à 30° et à la distance moyenne (voir Tab. XIII), on voit que ces trois maxima se manifestent aussi, mais avec quelque déplacement ; d'autre part, les minima s'accroissent principalement en été : au mois de juin ou d'août. Sans nous arrêter sur ce fait que la hauteur du soleil de 30° n'est pas atteinte, à Varsovie, pendant quelques mois d'hiver et que, par conséquent, les réductions à 30° y ont un caractère particulier, on peut dire, qu'en général, la marche de ces moyennes mensuelles de l'intensité du rayonnement dépend, d'une manière accentuée, des variations annuelles de l'humidité absolue <sup>(1)</sup>.

---

<sup>(1)</sup> Notons que déjà M. Soret, en se basant sur ses observations actinométriques (faites de 1867 à 1869 à Genève et sur divers sommets des Alpes), a donné les résultats suivants des mesures (que nous citons d'après « Rapport sur la radiation » de M. J. Violle au Congrès de Rome, 1879):

a) la radiation est, toutes choses égales d'ailleurs, plus forte par un temps sec que par un temps humide (fait déjà indiqué par Forbes).

§ 47. *Quelques renseignements sur la dépression de l'intensité du rayonnement solaire dans la période de décembre 1902 à février 1904.*

Les déductions précédentes, obtenues de nos résumés annuels de Varsovie, des cinq années 1901-1905, ne s'appliquent pas à la période de décembre 1902 à février 1904 qu'on peut appeler anormale. En effet, en comparant déjà les moyennes annuelles de l'intensité du rayonnement, pour les années successives 1901-1905, à Varsovie (voir Tab. XIII), on est frappé par la forte diminution qui s'est produite en 1903 ; cette diminution dans les moyennes annuelles atteint, en cette année, 13 pour cent environ, par rapport à la moyenne des cinq années et près de 20 pour cent par rapport à celle de 1901.

Cette forte dépression de l'intensité du rayonnement solaire n'a point un caractère local pour Varsovie ou pour la Pologne entière, mais elle fut signalée dans quelques autres points d'Europe et d'Amérique, où l'on avait effectué, dans cette période, des mesures actinométriques ou pyréliométriques.

Tout d'abord, on avait remarqué (p. ex. Gockel, Wolf, Talbot, Sack, etc.) la diminution de la transparence de l'atmosphère ; mais le mérite de signaler le premier le fait de

---

b) à Genève, comme à Rome (d'après les mesures de P. Secchi), la radiation est plus intense en hiver qu'en été *pour une même hauteur du soleil au-dessus de l'horizon*.

c) les intensités les plus considérables correspondent aux journées froides et sèches.

d) l'intensité à midi, un jour d'hiver, est parfois, à Genève, aussi forte qu'un jour d'été, la plus grande sécheresse de l'air compensant la moindre élévation du soleil au-dessus de l'horizon.

cette dépression dans les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire appartient à M. Dufour de Lausanne, lequel a rapporté le commencement de cette dépression au mois de décembre 1902.

En Amérique, la même diminution fut signalée par M. S. P. Langley à Washington ; ce savant, en s'appuyant sur les mesures spectrobolométriques, a trouvé que cette dépression, embrassant le spectre entier, est tout particulièrement accentuée pour les longueurs d'ondes plus petites. M. Langley soutient l'avis de M. Dufour que l'origine de cette dépression doit être cherchée dans l'influence de masses énormes de poussière (p. ex. de nature volcanique) sur la transparence de l'atmosphère <sup>(1)</sup>.

Puis M. H. H. Kimball a publié dans «Monthly Weather Review» (Washington, Weather Bureau) d'importants matériaux sur la question intéressante de cette dépression du rayonnement solaire, en s'appuyant, en partie, sur les mesures effectuées à Asheville et à Black Mountain en 1903. Les mémoires suivants « Abnormal variations in insolation » (Monthly Weather Review, N. 5, 1903), puis «Variations in insolation and in the polarization of blue sky light during 1903 and 1904 » (Proc. of the Third Conv. of Weather Bureau, 1904), ainsi que «The variations in atmospheric transparency during 1902, 1903 and 1904 » (Monthly Weather Review, N. 3, 1905) contiennent de nouveaux

---

(1) Notons que M. C. G. Abbot a formulé une hypothèse semblable (voir «Monthly Weather Review», vol. XXX, 1902, p. 179) à propos de la dépression, pour la période 1884-1886, des moyennes annuelles de l'intensité du rayonnement, publiées pour Montpellier depuis 1883 jusqu'à 1900, d'après les mesures faites avec l'actinomètre du système Crova. M. Abbot a attribué : «a marked depression for the years 1884 à 1886 in the curve of mean annual noon insolation to the presence of large quantities of volcanic dust in the air, due to the eruption of Krakatoa in 1883».

renseignements sur cette dépression qui a duré jusqu'en mars 1904.

En France, la même dépression a été signalée par M. Marchand («Annuaire de la Société Météorologique de France», 1905, pp. 40-45), qui s'appuya sur ses observations faites au Pic du Midi et à Bagnères.

D'après un mémoire publié par M. Ragnar Holm dans «Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik» (T. II, N. 4, Upsala, 1905), la dépression dans l'intensité du rayonnement solaire a été constatée aussi à Hald (Jutland), où, dans la période de juillet 1902 à juin 1903, les mesures pyrhéliométriques ont été effectuées régulièrement.

Enfin nous verrons plus loin que les données pyrhéliométriques à Modena, en Italie, publiées par M. C. Chistoni, permettent de constater la même dépression, qui y commence au mois de décembre 1902.

§ 48. *Résumé annuel moyen pour les cinq années 1901-1905, à Varsovie.*

En considérant le fait de la dépression, dans les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire, comme incontestable et général, tâchons de préciser davantage son caractère d'après les tables mensuelles et annuelles obtenues à Varsovie. La durée de cette dépression s'étend de décembre 1902 à février 1904, c.-à.-d. quinze mois. Les valeurs de la radiation sont tellement diminuées dans ce temps qu'on peut désigner immédiatement les limites de cette période.

Pour nous procurer les matériaux numériques, susceptibles de comparaisons, formons le résumé annuel moyen pour la période 1901-1905, excepté tous les mois de la dépression. Ces moyennes sont présentées dans la table suivante :

Table XVI.— *Résumé annuel moyen, d'après les mesures actinométriques de Varsovie [1901, 1902 (I-XI), 1904 (III-XII), 1905].*

| 1                                     | 2                      | 3            | 4                                | 5        | 6        | 7             |              |
|---------------------------------------|------------------------|--------------|----------------------------------|----------|----------|---------------|--------------|
| Mois                                  | Moy. Mens.<br><i>Q</i> | <i>h</i>     | <i>Q</i><br>(30°; dist.<br>moy.) | <i>n</i> | <i>f</i> | Max. <i>Q</i> |              |
| 1901 (I-XI), 1902 (I-XI), 1903 (I-XI) | I                      | 0.829*       | 17°                              | 1.010    | 14       | 3.0           | 0.937        |
|                                       | II                     | 1.082        | 25°                              | 1.126    | 12       | 2.7*          | 1.242        |
|                                       | III                    | 1.140        | 36°                              | 1.063    | 18       | 3.8           | 1.324        |
|                                       | IV                     | <b>1.185</b> | 47°                              | 1.047    | 19       | 5.4           | 1.320        |
|                                       | V                      | 1.164        | 56°                              | 0.998    | 48       | 7.0           | 1.346        |
|                                       | VI                     | 1.118        | 61°                              | 0.944    | 32       | 9.1           | 1.294        |
|                                       | VII                    | <b>1.173</b> | 59°                              | 1.008    | 35       | 9.7           | 1.328        |
|                                       | VIII                   | 1.119        | 51°                              | 0.975    | 31       | <b>10.3</b>   | 1.269        |
|                                       | IX                     | <b>1.159</b> | 41°                              | 1.063    | 32       | 8.0           | <b>1.367</b> |
|                                       | X                      | 1.036        | 29°                              | 1.042    | 15       | 6.8           | 1.241        |
|                                       | XI                     | 0.887        | 20°                              | 1.018    | 15       | 3.6           | 1.049        |
|                                       | XII                    | 0.862        | 15°                              | 1.088    | 7        | 4.2           | 0.975        |
| Année                                 |                        |              | 1.017                            | 278      | 7.1      |               |              |

Quant aux colonnes particulières de cette table, elles correspondent exactement à celles de la Tab. XIII. Remarquons seulement que, pour obtenir les données figurant dans la colonne 4, on a réduit les valeurs de la colonne 2 à la hauteur de 30° et à la distance moyenne, en considérant ces valeurs comme valables pour la distance de la terre au milieu du mois correspondant. Dans les résumés précédents, on a calculé directement les facteurs de réduction à la distance, d'après les dates des jours d'observation.

Ajoutons que les moyennes mensuelles *Q* du résumé annuel moyen sont représentées graphiquement (Pl. 2, courbe *m*) à la fin de cet ouvrage.

§ 49. *Sur les valeurs maxima de l'intensité du rayonnement solaire.*

Les maxima des valeurs de la radiation solaire, à Varsovie, pour la période 1901-1905, sont indiqués dans la dernière colonne de la Tab. XVI, séparément pour chaque mois. Ces données se rapportent aux diverses hauteurs du soleil et distances de la terre et ne sont pas, par conséquent, directement comparables; on peut néanmoins constater que la valeur la plus grande de l'intensité a été mesurée, à Varsovie, le 20. IX. 1902 à  $11^{\text{h}}19^{\text{m}}a$  (hauteur du soleil  $38^{\circ}6'$ ); elle fut trouvée égale à 1.349 gr. cal., ce qui donne 1.367 pour  $41^{\circ}$  et 1.270 gr. cal. pour la hauteur de  $30^{\circ}$  et pour la distance moyenne de la terre. La valeur de l'humidité absolue a été, dans ce temps, égale à 4,0 mm., et le ciel fut couvert, dans une grande partie, par des groupes compacts de cumulus, entre lesquels il y avait des bandes de bleu intense. La température, le 20. IX. 1902, n'a pas dépassé  $12^{\circ}$ .

Il est intéressant de comparer les maxima de la radiation solaire pour quelques endroits, où les données en gr. cal. peuvent être considérées comme directement comparables. Voici ce qu'on a obtenu:

1) A Guimar (île de Ténériffe,  $\varphi = 28^{\circ}3' \text{ N.}$ ), à l'altitude de 360 m. au-dessus du niveau de la mer, M. Ångström a mesuré 1.419 gr. cal. le 2. VII. 1896, à  $11^{\text{h}}54^{\text{m}}a$  (hauteur du soleil  $84^{\circ}33'$ ). La température était égale à  $27^{\circ}7'$  C. et l'humidité absolue à 11.4 mm.

2) A Modena, en Italie (latitude  $\varphi = 44^{\circ}6' \text{ N.}$ ), la valeur maximum, dans la période du 25. X. 1901 au 1. VII. 1903, fut obtenue le 26. VII. 1902. On a mesuré notamment 1.370

gr. cal. à 12<sup>h</sup>23<sup>m</sup>p. (hauteur du soleil 64°8) ; la température était égale à 28.2 Cels., l'humidité absolue 8.8 mm. Dans les «remarques», figure la caractéristique suivante de la journée : «sereno, lucido intorno al sole». La hauteur du lieu d'observation est de 64 m, au-dessus du niveau de la mer.

3) A Treurenberg (Spitzberg), M. Westman a mesuré 1.291 gr. cal. le 3. VII. 1900 à 10<sup>h</sup>24<sup>m</sup>a (hauteur du soleil 32°9) ; la température était égale à — 0°9 Cels. (l'humidité absolue 3.0 mm).

En comparant les maxima pour les quatre lieux suivants, situés entre 28 et 80 degrés de latitude, on a :

|                          |        |      |                                      |
|--------------------------|--------|------|--------------------------------------|
| Guimar (Ténériffe).....  | Max. Q | 1.42 | ( $h = 84^{\circ}6$ ; $f = 11.4$ mm) |
| Modena (Italie).....     | »      | 1.37 | ( $h = 64^{\circ}8$ ; $f = 8.8$ » )  |
| Varsovie (Pologne).....  | »      | 1.35 | ( $h = 38^{\circ}6$ ; $f = 4.0$ » )  |
| Treurenberg (Spitzberg). | »      | 1.29 | ( $h = 32^{\circ}9$ ; $f = 3.0$ » )  |

On voit par là que les différences, entre les valeurs non réduites, ne sont pas trop grandes. Ces données se rapportent aux endroits peu élevés au-dessus du niveau de la mer ; pour les stations de montagnes, les valeurs de la radiation sont plus grandes. Ainsi, p. ex., M. Ångström a mesuré 1.631 gr. cal. à Alta-Vista (Ténériffe), à une altitude de 3252 m., le 29. VI. 1896 à 11<sup>h</sup>58<sup>m</sup>a ( $h = 84^{\circ}9$ ). La température était de 13 degrés environ et l'humidité absolue de 2.2 mm. D'autre part, d'après les mesures de M. Exner, à Sonnblick (3106 m.), aux mois de juin et de juillet 1903, il résulte une valeur de 1.60 gr. cal. pour la hauteur du soleil à 70° environ ; l'épaisseur des couches atmosphériques est à peu près égale dans ces deux endroits.

La remarque suivante, citée par M. Ångström, concernant les faibles différences des valeurs de la radiation solaire dans les endroits peu élevés, ne manque pas d'intérêt. M. Ångström a mesuré, immédiatement après son retour de Ténériffe, au

mois d'août 1896, les valeurs de l'intensité dans le voisinage d'Upsala (latitude géographique  $\varphi = 59^{\circ}9$ , altitude 30 m. environ) et les a comparées avec les données de Guimar ( $\varphi = 28^{\circ}3$ , altitude 360 m.) pour les hauteurs égales du soleil; les résultats ont été très concordants et la diminution de l'intensité avec la hauteur du soleil s'est montrée seulement un peu plus forte pour la Suède que pour Ténériffe.

D'autre part, on obtient, dans les mois d'hiver, sous des latitudes plus grandes, des valeurs relativement considérables par rapport à celles que donnent les stations de montagnes, en été, pour les mêmes épaisseurs des couches atmosphériques traversées par les rayons solaires. M. Ångström cite, dans son travail de 1900, cet exemple que les valeurs de l'intensité mesurée à Upsala, le 5. III. 1899 (température —  $9^{\circ}7$  et l'humidité absolue 1,5 mm.), donnent des nombres (1,30 gr. cal. pour la hauteur du soleil voisine de  $23^{\circ}2$ ) qui ne sont pas moins grands que ceux qui ont été obtenus à Ténériffe, à l'altitude de 3683 m., pour les mêmes épaisseurs atmosphériques. D'où M. Ångström fait la remarque suivante: «On voit par là que, par une belle et froide journée d'hiver, la radiation est aussi grande à Upsala que sur le sommet du Pic par un jour d'été pour la même épaisseur atmosphérique».

#### § 50. *Sur la marche de la dépression du rayonnement solaire à Varsovie.*

Revenons maintenant à la dépression des valeurs de l'intensité du rayonnement solaire dans la période de décembre 1902 à février 1904; en comparant <sup>(1)</sup> les valeurs mensuelles

---

(1) Voir aussi les courbes de la Pl. 2 à la fin de cet ouvrage.

dans cette dernière période (voir Tab. XIII) avec notre résumé annuel moyen (voir Tab. XVI), on voit que :

1) La dépression s'accroît brusquement au mois de décembre 1902, en donnant à Varsovie, dès le commencement, des valeurs de 20 pour cent environ plus basses <sup>(1)</sup> que celles du résumé annuel moyen.

2) Par suite de cette forte dépression, toute la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire en 1903 subit une perturbation, laquelle a masqué ou même changé les variations habituelles de la radiation dans cette année, à Varsovie.

3) Cette dépression, persistant du mois de décembre 1902 jusqu'au mois de février 1904 inclusivement et donnant une diminution moyenne de l'intensité dépassant 15 pour cent, n'a pas eu, dans sa marche, un caractère uniforme, mais, au contraire, elle a présenté quelques oscillations.

4) Après une brusque et forte diminution en décembre 1902 et après des valeurs de l'intensité particulièrement déprimées <sup>(2)</sup> aux mois de février et mars 1903, un certain

---

<sup>(1)</sup> Citons que M. Marchand (l. c.) estime la diminution de l'intensité à 20 pour cent, en janvier 1903, d'après les résultats des mesures faites au Pic du Midi et de Bagnères (Pyrénées). Le même observateur donne, pour le mois d'août 1903, une diminution de 10 pour cent environ.

<sup>(2)</sup> Remarquons que tous les observateurs sont d'accord à propos de la dépression particulièrement grande, pendant le premier trimestre 1903. D'après une table, donnée par M. H. Dufour dans son travail «Insolation en Suisse» (p. 29), il s'ensuit que ces moyennes de l'intensité pour l'année 1903 donnent des valeurs particulièrement diminuées (par comparaison avec la période 1897-1902) pour le mois de février et surtout de mars. M. Ragnar Holm (Arkiv för Mat., Astr. och Fysik ; l. c.), en parlant de la dépression du rayonnement solaire en 1903 pendant la période d'observation à Hald, dit : «Während der ersten Hälfte des Jahres 1903 war die Sonnenstrahlung über der *Station franco-scandinave* sehr deprimiert, und zwar infolge einer anderen Ursache als grossen Feuchtigkeitsgehalts der Luft. Das Maximum der Depression scheint im März vorhanden gewesen zu sein».

M. H. H. Kimball, dans son mémoire cité (Proc. of Third Conv.), s'exprime de

affaiblissement de cette dépression paraît s'accroître pendant les mois d'été 1903; les valeurs de juin de cette année montrent, à Varsovie, même des nombres relativement assez grands. Mais, déjà en juillet et dans les mois suivants jusqu'à octobre la dépression s'accroît très nettement s'élevant à 15 pour cent environ. La fin de 1903, de même que les mois de janvier et de février 1904, présentent de nouveau un grand accroissement de la dépression et les valeurs de l'intensité observées pendant ces mois semblent encore plus déprimées qu'au commencement de l'année 1903. Ainsi le mois de février 1904 donne des valeurs diminuées plus que de 30 pour cent. La dépression se termine dans ce même mois, d'une manière aussi brusque qu'à son commencement.

Cette profonde perturbation dans les valeurs de la radiation solaire arrivant à la surface terrestre a pu avoir d'importantes conséquences météorologiques. La question de cette influence serait du plus haut intérêt et nécessiterait des recherches spéciales, bien que le problème présente de grandes difficultés et complications.

Ajoutons que l'étude de cette question fut déjà commencée par M. Langley dans un mémoire important publié dans l'«*Astrophysical Journal*» (vol. 19, pp. 305-321) sous le titre «*On a possible variation of the solar radiation and its probable effect on terrestrial temperatures*».

---

la façon suivante à propos de la grande diminution de l'intensité pendant le premier trimestre 1903 : «*I was surprised at the small value of the solar radiation received at the surface of the earth during January, February, and March, 1903, but particularly during March*». Et puis le même auteur ajoute : «*From January, 1903 to March, 1904, inclusive, there was a marked deficiency in the radiation measurements as compared with similar measurements made by Mr. Harvey N. Davis at Providence, R. J., in 1902, amounting in some months to as much as 30 per cent, and in others to less than half this amount*».

Terminons le présent chapitre par la remarque que les brefs renseignements que nous y avons donnés à propos de la marche de la dépression du rayonnement d'après les mesures effectuées à Varsovie ne sauraient apporter naturellement qu'une petite contribution à l'étude générale de cette dépression d'après les mesures faites dans divers endroits. Cette étude, qui n'a pas pu entrer dans le présent travail, nécessite des recherches spéciales, commencées d'ailleurs en partie dans le mémoire cité de M. Langley.

---

## CHAPITRE DIXIÈME

Sur un schema numérique pour Varsovie et sur le caractère des variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire dans quelques autres endroits.

§ 51. *Essai d'un schema numérique pour les variations annuelles de l'intensité de la radiation à Varsovie.*

Dans le chapitre VII du présent travail, nous avons déduit les réductions fondamentales à la hauteur du soleil et à la distance de la terre ; de même, nous y avons essayé de trouver les valeurs approximatives moyennes pour les variations de l'intensité du rayonnement solaire sous l'influence de l'humidité absolue. En même temps, nous avons vu que, pour les autres endroits où ont été effectuées les mesures pyrhéliométriques, ces réductions ne présentent pas des changements considérables.

Remarquons que, si nous avons fait déjà un large usage des réductions, à la hauteur du soleil et à la distance de la terre, pour la marche annuelle de l'intensité, les variations des valeurs du rayonnement solaire avec l'humidité n'ont pas été jusqu'à présent utilisées par nous.

Nous nous posons maintenant l'intéressante question suivante : les réductions à la hauteur, à la distance et à l'humidité, établies dans le chapitre VII, sont-elles déjà

suffisantes pour nous expliquer la position des maxima et des minima de la courbe annuelle de l'intensité du rayonnement solaire, telle p. ex., quelle nous révèlent les mesures directes de Varsovie?

Ainsi, en prenant Varsovie comme point de départ, comparons ses résumés annuels avec les données du schéma numérique, indiqué ci-dessous.

Admettons comme valeur initiale

$$Q_0 = 1.00 \frac{\text{gr. cal.}}{\text{cm}^2, \text{min.}} (30^\circ, \text{ dist. moy. et 8.0 mm. de l'hum. abs.}).$$

et formons la table suivante :

Table XVII.—*Schema numérique pour les variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire, à Varsovie.*

| 1<br>Date | 2<br><i>h</i> | 3<br><i>f</i> | 4<br><i>a</i> | 5<br><i>b</i> | 6<br><i>Q</i> |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 15. I     | 17°           | 3.0           | 0.787         | 0.813         | 0.91          |
| » II      | 23°           | 2.7           | 0.930         | 0.952         | 1.06          |
| » III     | 36°           | 3.8           | 1.066         | 1.077         | 1.16          |
| » IV      | 47°           | 5.4           | 1.146         | 1.137         | <b>1.19</b>   |
| » V       | 56°           | 7.0           | 1.188         | 1.161         | 1.18          |
| » VI      | 61°           | 9.1           | 1.203         | 1.164         | 1.14          |
| » VII     | 59°           | 9.7           | 1.197         | 1.157         | 1.12          |
| » VIII    | 51°           | 10.3          | 1.168         | 1.140         | 1.09          |
| » IX      | 41°           | 8.0           | 1.106         | 1.095         | <b>1.10</b>   |
| » X       | 29°           | 6.8           | 0.987         | 0.993         | 1.02          |
| » XI      | 20°           | 3.6           | 0.847         | 0.866         | 0.95          |
| » XII     | 15°           | 4.2           | 0.739         | 0.763         | 0.84*         |

Les colonnes successives de cette table ont la signification suivante :

1) La première colonne renferme les dates et notamment les quinze de chaque mois.

2) La seconde — la hauteur correspondante du soleil, en degrés entiers, à midi des jours désignés précédemment.

3) La troisième — les valeurs  $f$ , en mm., de l'humidité absolue, pour les mêmes jours ; pour ces données, on a pris les moyennes, figurant dans le résumé annuel moyen de Varsovie (voir Tab. XVI).

On pourrait cependant, pour obtenir ces valeurs, utiliser directement les matériaux contenus dans les tables météorologiques habituelles.

4) La quatrième colonne renferme les valeurs de la radiation telles qu'elles seraient observées à midi du quinze de chaque mois, si la hauteur du soleil était le seul facteur influant sur la marche annuelle du rayonnement solaire.

Ces données furent calculées d'après la valeur initiale admise  $Q_0$ , en employant les réductions à la hauteur du soleil, à Varsovie. Il est évident que les variations annuelles sont ici les mêmes que celles de la hauteur du soleil (voir colonne 2) ; la valeur maximum est atteinte le 15 juin, la valeur minimum le 15 décembre. Dans ce cas, on obtiendrait une marche annuelle uniforme avec un maximum et un minimum, sans variations secondaires.

5) La cinquième colonne prend encore en considération les distances réelles de la terre au soleil, au milieu de chaque mois, toutes les données de la colonne précédente se rapportant à une distance moyenne. Cette réduction a été opérée au moyen des réductions indiquées au § 38.

On voit que les valeurs  $b$  permettent déjà de constater un certain déplacement du maximum vers le printemps.

6) Enfin, dans la dernière colonne, on a réduit les valeurs de l'intensité à celles de l'humidité absolue, indiquées dans la colonne 3°, les valeurs  $a$  et  $b$  se rapportant toutes à l'humidité

commune de 8 mm. Pour opérer cette réduction, on a supposé <sup>(1)</sup> que

$$\Delta Q = - 0.02. \Delta f \quad (156)$$

d'après § 39. Etant donné le caractère tout à fait approximatif de cette dernière réduction, les valeurs de  $Q$  (dans la colonne 6<sup>e</sup>) ont été limitées à deux chiffres décimaux.

On voit que l'influence de la vapeur d'eau est ici décisive et cause un déplacement du maximum vers le printemps (la valeur, la plus élevée, parmi les données citées est atteinte le 15. IV); en outre, il s'accroît un maximum d'automne, très caractéristique dans divers endroits situés sous les latitudes moyennes.

Nous avons donc obtenu un résultat assez intéressant; quoiqu'on ait attribué, depuis longtemps, à l'influence de l'humidité absolue les maxima de la courbe annuelle de l'intensité, notre schéma montre numériquement que la vapeur d'eau, la hauteur du soleil et la distance de la terre suffisent déjà pour expliquer le déplacement du maximum et son doublement.

Il est évident qu'à ce point se borne, au moins à présent, le rôle de notre schéma numérique et cela d'autant plus que la réduction, si fondamentale à l'humidité absolue est connue seulement d'une manière très imparfaite. La comparaison des valeurs théoriques pour le 15 de chaque mois avec les moyennes mensuelles, obtenues pour Varsovie en 1901-1905, nous montre que les résultats étant concordants pour les deux maxima, il reste cependant encore un maximum d'été qui ne figure pas dans le schéma numérique. Il y a donc une

---

<sup>(1)</sup> Cette supposition a le caractère d'une première approximation, sans doute très imparfaite. Pour les objections et pour les raisons théoriques de l'insuffisance d'une telle supposition voir pp. 117-121.

lacune. dépendant sans doute de la non-prise en considération d'autres facteurs et d'autres variations dans les conditions météorologiques pendant la période donnée.

Nous n'insisterons pas davantage sur ce point, en nous bornant à cette remarque générale.

A la fin de ce paragraphe, ajoutons que notre schema serait susceptible, outre cette représentation numérique, d'un développement analytique; pour cela, il faudrait admettre qu'on pût présenter  $Q$  comme fonction des trois variables principales

$$Q = F(h, s, f) \quad (157)$$

et se servir des valeurs de réduction à la hauteur  $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$ , des variations connues de la distance  $\Delta s$  et supposer [d'accord avec la relation approximative (156)] que l'influence de l'humidité absolue fût p. ex. de la forme <sup>(1)</sup>

$$Q = k_1 - k_2 \cdot f \quad (158)$$

où  $k_1$  et  $k_2$  seraient des coefficients indépendants de  $f$ . Cette dernière supposition est d'ailleurs peu fondée au point de vue théorique et donne lieu à de nombreuses objections.

---

<sup>(1)</sup> Pendant l'impression du présent travail nous avons trouvé dans «Proceedings and Transactions of the Meteorological Society of Mauritius» (Vol. I, Nouv. série; ile océanique de Maurice, 1900) les tables (pp. 105-109) contenant les résultats des observations actinométriques, faites à l'Observatoire Royal d'Alfred pendant la période 1887-1897. Ces mesures ont été effectuées avec un actinomètre, décrit par M. Balfour Stewart dans Nature angl (Vol. XIII, p. 118); les moyennes mensuelles de l'intensité du rayonnement solaire sont exprimées en degrés Fahrenheit. Le texte qui accompagne les tables contient cependant le passage suivant qui mérite d'être rapporté ici. «We find that the mean monthly values of  $A$  (the original heat) thus formed (réduites à la hauteur commune et à la distance moyenne) furnish a curve which follows very closely the inverted annual humidity curve, clearly showing that the amount of heat received from the sun depends upon, and varies inversely as, the amount of moisture in the air».

§ 52. *Sur le caractère des variations annuelles de la radiation solaire à Treurenberg (Spitzberg).*

En profitant des mesures pyrhéliométriques et des observations météorologiques, effectuées par M. Westman à Treurenberg (publiées dans «Missions scientifiques pour la mesure d'un arc du méridien». T. II. Stockholm, 1904), examinons si notre schéma numérique est susceptible de donner des indications générales sur le caractère des variations annuelles de l'intensité dans les régions polaires. Pour plus de généralité, prenons pour Treurenberg les réductions à la hauteur égales à celles de Varsovie.

Comme valeur initiale  $Q_0$ , admettons pour Treurenberg

$$Q_0 = 1.15 \frac{\text{gr. cal.}}{\text{cm}^2, \text{min.}} (20^\circ, \text{dist. moy. et } 2.0 \text{ mm. de l'hum. abs.})$$

et dressons le schéma numérique par le procédé identique à celui de Varsovie. Les colonnes de la Tab. XVIII correspondent tout à fait aux colonnes analogues de la Tab. XVII ; le défaut des données dans quelques mois s'explique par la présence de la nuit polaire pendant ce temps.

Table XVIII.— *Schema numérique des variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire, à Treurenberg (d'après les réductions à la hauteur du soleil, établies pour Varsovie).*

| 1<br>Date | 2<br>$h$ | 3<br>$f$ | 4<br>$a$ | 5<br>$b$ | 6<br>$Q$    |
|-----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| 15. III   | 9°       | 0.3      | 0.829    | 0.837    | 0.87        |
| » IV      | 20°      | 1.2      | 1.150    | 1.141    | 1.16        |
| » V       | 28°      | 2.1      | 1.276    | 1.246    | 1.24        |
| » VI      | 33°      | 3.6      | 1.339    | 1.296    | <b>1.26</b> |
| » VII     | 31°      | 4.3      | 1.316    | 1.273    | 1.23        |
| » VIII    | 23°      | 4.4      | 1.202    | 1.171    | 1.12        |
| » IX      | 13°      | 3.8      | 0.983    | 0.973    | 0.94        |

On voit, d'après ce schema, qu'à Treurenberg — par suite d'une petite amplitude dans la marche annuelle de l'humidité absolue — il faut s'attendre seulement à un maximum d'été ; le maximum d'automne, comme les maxima secondaires en général, ne se produisent pas dans les régions polaires.

Comparons cette conclusion avec les résultats des mesures, effectuées par M. Westman à Treurenberg-Bai, pendant la période de septembre 1899 à juillet 1900.

En s'appuyant sur les tables mensuelles pour cet endroit, ainsi que sur les valeurs des réductions, établies directement pour Treurenberg, on obtient le résumé annuel suivant :

Table XIX. — *Résumé annuel, d'après mesures pyrhéliométriques à Treurenberg (1899/1900)*

| Mois       | $Q$<br>Moy. Mens. | $h$ | mm. | Moy. Mens.<br>$Q$<br>(30° dist.<br>moy.) | $n$ | Max. $Q$ |
|------------|-------------------|-----|-----|------------------------------------------|-----|----------|
| 1899<br>IX | 1.081             | 13° | 3.8 | 1.415                                    | 11  | 1.284    |
| 1900<br>IV | 1.119             | 20° | 1.4 | 1.278                                    | 6   | 1.213    |
| V          | 1.214             | 28° | 1.8 | 1.269                                    | 11  | 1.316    |
| VI         | <b>1.245</b>      | 33° | 3.6 | 1.260                                    | 7   | 1.269    |
| VII        | 1.235             | 31° | 3.6 | 1.266                                    | 5   | 1.281    |
| Année.     |                   |     | 2.8 | 1.309                                    | 40  |          |

D'après ces données, bien qu'incomplètes par suite de l'absence du mois d'août, on voit déjà que l'intensité du rayonnement ne présente, à Treurenberg, qu'un maximum d'été d'accord avec la plus grande hauteur du soleil. Remarquons que les valeurs de  $Q$  de la Tab. XVIII et les moyennes

mensuelles de la Tab. XIX seraient plus rapprochées, si les réductions à la hauteur du soleil étaient prises (dans la Tab. XVIII) directement pour Treurenberg et si les valeurs de l'humidité absolue étaient déduites d'après les jours d'observation et non pas d'après les tables météorologiques mensuelles.

En comparant les résumés annuels de Varsovie et de Treurenberg, nous voyons que les moyennes mensuelles (réduites à la hauteur commune du soleil de  $30^\circ$  et à la distance moyenne de la terre) sont plus grandes pour cet endroit polaire que pour les latitudes p. ex. de la Pologne. Cette différence tient, en premier lieu, à la quantité de la vapeur d'eau beaucoup moins considérable à Treureuberg, par suite des basses températures, qu'à Varsovie, ainsi que, probablement, à la transparence plus grande de l'atmosphère vers le pôle. Quant aux valeurs de  $Q$  (réduites à la hauteur de  $30^\circ$  pour faciliter les comparaisons avec Varsovie), remarquons que cette dernière hauteur n'est pas atteinte, à Treurenberg, pendant la plupart des mois.

§ 53. *Remarques sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire, d'après les résultats des mesures pyrhéliométriques.*

Les mesures avec le pyrhéliomètre de compensation électrique d'Ångström ont été, pour ce que nous en savons, effectuées : dans l'île de Ténériffe, en 1895-1896 ; à Treurenberg (Spitzberg), en 1899-1900 ; à Varsovie, en des temps différents, pendant la période 1901-1905 ; à Providence, dans l'Amérique du Nord, en 1901-1902 ; à Asheville et Black Mountain, en Amérique, en 1902-1903 ; à Hald (Jutland), en 1902-1903 ; à Zakopane (Galicie), en 1903 ; à Modena (Italie), en 1901-1903, et enfin, pendant quelques jours, à Sonnblick.

Inutile d'ajouter que les travaux de M. Langley contiennent aussi des matériaux d'une très haute valeur pour les recherches en question.

Tous ces importants matériaux exigeraient des études spéciales ; nous nous bornerons ici à quelques remarques très courtes. Les matériaux de Ténériffe, Treurenberg, Sonnblick et Varsovie ont été déjà utilisés plus haut.

Table XX. — *Maxima mensuels (non réduits), d'après les mesures pyréliométriques.*

| Mois | Providence |       | Asheville |       | Black Mountain<br>1903 | Modena |         |       | Zakopane<br>1903 |
|------|------------|-------|-----------|-------|------------------------|--------|---------|-------|------------------|
|      | 1901       | 1902  | 1902      | 1903  |                        | 1901   | 1902    | 1903  |                  |
| I    |            | 1.179 |           | 0.911 |                        |        | 1.196   | 0.908 |                  |
| II   |            | 1.186 |           |       |                        |        | (0.998) | 1.015 |                  |
| III  |            | 1.363 |           |       | 1.105                  |        | 1.329   | 1.118 |                  |
| IV   |            | 1.270 |           |       |                        |        | 1.280   | 1.143 |                  |
| V    |            | 1.302 |           |       |                        |        | 1.258   | 1.122 |                  |
| VI   |            | 1.251 |           |       |                        |        | 1.223   | 1.033 |                  |
| VII  |            | 1.173 |           |       |                        |        | 1.370   |       |                  |
| VIII |            | 1.242 |           |       |                        |        | 1.279   |       | 1.210            |
| IX   |            | 1.168 |           |       |                        |        | 1.320   |       | 1.242            |
| X    |            |       |           |       |                        |        | 1.192   |       |                  |
| XI   | 1.143      |       |           |       |                        | 1.131  | 1.037   |       |                  |
| XII  | 0.868      |       | 1.043     |       |                        | 1.162  | 1.043   |       |                  |

1) Les mesures de Providence ont été effectuées par M. H. N. Davis et publiées dans Monthly W. Review (N. 6, vol. XXXI, June 1903). La période d'observation à Providence ( $\varphi = 41^{\circ}50'$ ) dura du 1<sup>er</sup> novembre 1901 au 28 septembre 1902; les mesures en gr. cal. sont rapportées dans des tables contenant aussi les principaux éléments météorologiques. Il n'y a pas de discussion sur les résultats des mesures, mais déjà la première comparaison prouve l'existence du maximum du printemps, qui coïncide, en 1902, à Providence, avec les maxima correspondants mesurés, pendant la même période,

à Varsovie et à Modena. Dans la Tab. XX, se trouvent les valeurs mensuelles les plus élevées de l'intensité, à Providence, prises parmi les résultats directs des mesures faites dans chaque mois.

2) Les matériaux des mesures d'Asheville ( $\varphi = 35^{\circ}36' \text{ N.}$ ,  $\lambda = 82^{\circ}32' \text{ W.}$ ,  $h = 2200 \text{ feet}$ ) et de Black Mountain ( $\varphi = 35^{\circ}36' \text{ N.}$ ,  $\lambda = 82^{\circ}19' \text{ W.}$ ,  $h = 2400 \text{ feet}$ ) ont été publiés par M. H. N. Kimball dans «Monthly Weather Review» (vol. XXXI, N. 7, July, 1903). La période d'observation s'étendit du 10. XI. 1902 au 14. II. 1903 pour Asheville et du 19. II. 1903 au 26. III. 1903 pour Black Mountain. M. Kimball fait précéder son mémoire de l'examen détaillé des pyrhéliomètres ; pour l'appareil N. 28, employé pour les mesures à Providence, il constate que celui-ci donne seulement 92 pour cent de valeurs justes.

Les tables des mesures contiennent les principaux éléments météorologiques ; on a effectué aussi des déterminations de polarisation avec un instrument de M. Pickering. La période étant relativement courte, la discussion des mesures n'a pas pu fournir toutes les données nécessaires pour la marche annuelle ; il semble cependant que la dépression, au commencement de l'année 1903, se produit aussi à Asheville. Dans la Tab. XX, sont reproduits quelques maxima mensuels tirés des tables, publiées par M. Kimball.

3) Les mesures de l'intensité du rayonnement solaire dans l'Observatoire géophysique de Modena [ $\varphi = 44^{\circ}39' \text{ N.}$ ,  $\lambda = 0^{\text{h}}43^{\text{m}}42^{\text{s}} \text{ E. Gr.}$ ,  $h = 64 \text{ m.}$ ] sont faites, à partir du 25 octobre 1901, avec le pyrhéliomètre de compensation. Ces mesures, accompagnées des principaux éléments météorologiques, sont publiées par M. Chistoni dans «Rendiconti della R. Accademia dei Lincei» (1905, 1906) et renferment actuellement les données jusqu'à la fin de juin 1903. Dans la Tabl. XX, sont

indiquées les valeurs mensuelles, les plus élevées, prises d'après les mesures directes sans aucune réduction. Soulignons que les trois maxima : en mars, juillet et septembre 1902, à Modena, coïncident exactement avec les trois maxima observés à Varsovie, dans cette même année (voir les Tables XX et XIII). En outre, les valeurs obtenues dans la première moitié de l'année 1903, à Modena, sont beaucoup plus basses que celles de l'année 1902 ; ce résultat, nous le savons, s'applique aussi à Varsovie.

4) A Zakopane ( $\varphi = 49^{\circ}3$ ,  $\lambda = 1^{\text{h}}19^{\text{m}}51^{\text{s}}$  E. Gr.), les mesures, avec le pyrhéliomètre de compensation, ont été effectuées par M. Witkowski pendant les mois d'août et de septembre 1903 et publiées dans les annales météorologiques «Wypadki spostrzezen meteorologicznych w Galicyi w r. 1903» (Cracovie, 1905). Nous en avons déjà parlé au § 36 ; au § 42 (Tab. XI), sont données les tables mensuelles pour Zakopane.

D'après ces dernières tables, il résulte que la moyenne mensuelle est égale à 1.172 gr. cal. pour août et à 1.197 gr. cal. pour septembre 1903. Nous avons donc ici un maximum d'automne, lequel est caractéristique pour les latitudes moyennes et peut être prévu d'avance.

5) A Hald (Jutland), les mesures pyrhéliométriques ont été effectuées par M. R. Holm (avec M. Jansson), pendant la période de juillet 1902 à juin 1903 ; ces mesures sont publiées dans les «Travaux de la station franco-scandinave de sondages aériens». Un extrait de ces mesures est donné dans le mémoire de M. Holm «Ueber die abnorm kleine Sonnenstrahlung in den Jahren 1902 und 1903» (Arkiv för Matem., Astron. och Fysik ; Bd. 2, N. 4, Upsala 1905), dans lequel l'auteur prouve l'existence, à Hald, de la dépression dans les valeurs de l'intensité en 1903.

§ 54. *Remarques sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire dans quelques endroits, d'après les résultats des mesures actinométriques.*

Les séries de mesures de l'intensité <sup>(1)</sup>, au moyen des actinomètres des diverses constructions, ont été surtout effectuées: à Cap Horn ( $\varphi = 55^{\circ}5$  S.), pendant la période 1882-1883, à Montpellier ( $\varphi = 43^{\circ}6$  N.), pendant la période 1883-1900, à Kiew ( $\varphi = 50^{\circ}4$  N.), en 1888 et quelques années suivantes, à Pawlowsk ( $\varphi = 59^{\circ}7$  N.), depuis 1892, à Pétersbourg ( $\varphi = 59^{\circ}7$  N.), depuis 1895, à Ekaterinenbourg ( $\varphi = 56^{\circ}8$  N.), pendant la période 1896-1898, à Clarens-Lausanne ( $\varphi = 46^{\circ}5$  N.), depuis 1896, etc., etc. En outre, des séries d'observations

---

<sup>(1)</sup> Insistons sur ce fait que nous ne citons ici que des séries d'observations actinométriques (en gr. cal.) effectuées pendant les périodes suffisamment longues en vue de l'étude des variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire. C'est pourquoi nous ne citons pas de nombreuses recherches actinométriques, entreprises pour l'étude de la variation de la radiation avec l'altitude et particulièrement pour déterminer la valeur de la constante solaire. Ces mesures, faites à différentes hauteurs dans les montagnes, sont de courte durée.

Notons que, parmi ces dernières recherches, les plus connues sont les mesures de MM. J. Forbes et Kämtz sur le Faulhorn et à Brienz (1832), les déterminations de Bravais et de Martins sur le Mont Blanc et à Chamounix (1844), les observations de M. Soret à différentes altitudes en Suisse (1867-1869), les mesures de MM. Desains et Branly sur le Righi-Culm et à Lucerne (1869), de même que celles de MM. Violle et Margottet sur le Mont Blanc (1875).

~ Les mesures de montagnes plus récentes ont été faites par M. S. Langley sur le Mount Whitney (1881), par MM. Crova et Houdaille sur le Mont Ventoux (1888), par MM. Crova et Hansky sur le Mont Blanc (1896 et 1897), par M. Rizzo sur le Monte Rosa (1896) et sur le Rocciamelone (1897) et par M. Stankewitch sur le Pamir (1900). Les travaux de M. K. Ångström à Ténériffe (1895 et 1896) ont été déjà mentionnés ici à plusieurs reprises.

Ajoutons qu'un certain nombre des mesures actinométriques a été aussi effectué à l'occasion des diverses éclipses du soleil.

particulièrement nombreuses ont été faites avec les thermomètres dits de radiation. A l'Observatoire Royal d'Alfred (île océanique de Maurice), les mesures ont été faites (1887-1897) avec l'actinomètre du système Balfour Stewart ; les résultats de ces observations actinométriques (exprimés en degrés Fahrenheit) ont été publiés dans *Proceedings and Transactions of the Meteorological Society of Mauritius* (vol. I, New series, pp. 105-109 ; Mauritius, 1900).

Nous donnons ci-dessous quelques renseignements très courts sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité, dans quelques-uns de ces endroits. Remarquons qu'en général la plupart de ces données ne peuvent être considérées comme gr. cal., ce qui n'empêche pas d'ailleurs qu'elles ne puissent garder leurs valeurs comme mesures relatives.

Considérons deux groupes de données : premièrement les mesures de Montpellier et de Lausanne-Clarens, où l'on a employé l'actinomètre du système Crova ; puis les mesures de Pawlowsk, Pétersbourg et Ekaterinenbourg, où l'on s'est servi de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson, en admettant l'existence d'une « constante » de l'appareil. Pour ce dernier groupe, il est indiqué que les mesures correspondantes ne sont comparables ni entre elles, ni avec les données pyrhéliométriques exprimées en valeur absolue.

Tout d'abord citons, dans la Tab. XXI, les moyennes mensuelles pour les endroits où les mesures actinométriques ont été effectuées régulièrement pendant des périodes plus longues.

( Voir Tab. XXI, p. 164 )

Table XXI. — *Moyennes mensuelles, d'après les mesures actinométriques.*

| Mois | 1883-1900   |     | 1896-1902        |     | 1896-1900   |     | 1896-1900   |     | 1896-1898       |      |
|------|-------------|-----|------------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-----------------|------|
|      | Montpellier |     | Clarens-Lausanne |     | Pawlowsk    |     | Pétersbourg |     | Ekatérinenbourg |      |
|      | Q           | h   | Q                | h   | Q           | h   | Q           | h   | Q               | h    |
| I    | 1.05        | 25° | 0.79             | 22° | 0.94        | 9°  | 0.79        | 9°  | —               | 120° |
| II   | 1.09        | 31° | 0.85             | 31° | 1.13        | 18° | 1.08        | 18° | 1.30            | 21°  |
| III  | 1.12        | 44° | 0.90             | 41° | 1.29        | 28° | 1.20        | 28° | 1.41            | 34°  |
| IV   | <b>1.16</b> | 56° | <b>0.91</b>      | 53° | <b>1.36</b> | 40° | <b>1.30</b> | 40° | <b>1.45</b>     | 43°  |
| V    | 1.14        | 65° | 0.86             | 62° | 1.30        | 49° | 1.25        | 49° | 1.36            | 52°  |
| VI   | 1.14        | 70° | 0.85             | 67° | 1.28        | 54° | 1.22        | 54° | 1.33            | 57°  |
| VII  | 1.13        | 68° | 0.86             | 65° | 1.25        | 52° | 1.21        | 52° | 1.31            | 55°  |
| VIII | 1.12        | 60° | <b>0.88</b>      | 57° | 1.22        | 44° | 1.17        | 44° | 1.30            | 47°  |
| IX   | <b>1.12</b> | 49° | 0.86             | 46° | <b>1.28</b> | 33° | 1.13        | 33° | 1.30            | 36°  |
| X    | 1.08        | 38° | <b>0.86</b>      | 35° | 1.14        | 22° | 1.11        | 22° | <b>1.34</b>     | 25°  |
| XI   | 1.05        | 28° | 0.82             | 25° | 1.02        | 12° | 0.83        | 12° | 1.24            | 15°  |
| XII  | 1.01*       | 23° | 0.75*            | 20° | 0.85*       | 7°  | 0.68*       | 7°  | 1.01*           | 10°  |

N.-B. — Les colonnes *h* indiquent les hauteurs du soleil (en degrés entiers) du milieu du mois, pour l'endroit donné.

A). Les mesures de Montpellier ont été publiées, chaque année, dans le « Bulletin météorologique du département de l'Hérault » ; elles ont été effectuées « un peu avant midi » dans les jours suffisamment clairs. Les valeurs mensuelles et annuelles ont été formées, sans réductions, comme les moyennes arithmétiques.

Les moyennes de la période 1883-1900 (voir Tab. XXI) donnent le maximum principal au mois d'avril, le maximum secondaire en septembre et le minimum en décembre. Il est intéressant de remarquer que cette marche annuelle correspond au schéma numérique, dressé pour Varsovie.

Ajoutons que la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire à Montpellier se présente d'une manière régulière seulement pour les périodes assez longues, tandis que dans les années particulières se montrent souvent les maxima

d'été ou certaines dépressions temporaires, durant quelques mois. M. Crova, en discutant dans «Bull. mét. de l'Hérault» les données des années consécutives, a remarqué que la plupart de ces écarts dépendent des conditions météorologiques spéciales des mois ou des années en question.

Les mesures à Lausanne et à Clarens sont effectuées au moyen de l'actinomètre de la même construction qu'à Montpellier.

Dans le travail de M. Dufour «L'Insolation en Suisse» (Archives des sciences phys. et nat., Genève, 1903), se trouvent les moyennes mensuelles et annuelles, formées ensemble sans réductions, pour ces deux lieux d'observation.

De la Tab. XXI, on voit que le maximum principal tombe à Lausanne-Clarens au mois d'avril, les maxima secondaires s'accroissant au mois d'août et d'octobre. Cela s'applique aux moyennes de la période 1896-1902, les années, prises séparément, présentant de nombreuses oscillations ; dans la période de décembre 1902 jusqu'au commencement de 1904, il s'accroît une forte dépression dans les valeurs du rayonnement solaire.

Les nombres qui expriment ces intensités sont, en général, assez bas à Lausanne-Clarens ; les maxima «absolus» n'y dépassent que rarement 1,00, tandis qu'à Montpellier les valeurs analogues, obtenues avec l'actinomètre de la même construction, dépassent quelquefois même le nombre 1,50.

B) Les mesures de Pawlowsk, Pétersbourg et Ekaterinenbourg ont été faites avec les actinomètres du système Ångström-Chwolson ; elles sont publiées dans les «Annales de l'Observatoire Physique» et dans les «Bulletins de l'Académie des Sciences» de St-Pétersbourg.

Ces données actinométriques ayant été converties en valeurs absolues, en admettant l'existence d'une constante de l'appareil, nous savons d'après le § 8 qu'elles ne sont pas tout à fait

comparables et ne peuvent être considérées comme exprimées en gr. cal. D'ailleurs, il semble que le pyréliomètre de Pawlowsk, employé comme étalon, donne aussi des valeurs trop grandes.

Les moyennes mensuelles indiquées pour ces trois lieux, dans la Tab. XXI, ont été calculées par un procédé analogue que nous avons employé pour Varsovie et Treurenberg. Elles ont été établies par l'auteur dans le mémoire «Etudes sur la marche annuelle de l'insolation», publié au moment où la variabilité du coefficient de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson n'était pas encore établie.

D'après les résultats du présent travail, nous voyons que ces mesures nécessiteraient des réductions et des calculs nouveaux pour les rendre comparables avec les mesures absolues de l'intensité du rayonnement solaire.

La marche annuelle (voir Tab. XXI) montre un maximum du printemps en avril, pour tous les trois endroits, et un maximum secondaire qui tombe au mois de septembre, pour Pawlowsk, et au mois d'octobre, pour Ekatérinenbourg.

Dans les années particulières, on voit de nombreuses oscillations, surtout à Pétersbourg et à Ekatérinenbourg, où les déterminations des «constantes» semblent ne pas présenter la même précision qu'à Pawlowsk.

Remarquons que les marches annuelles, citées tout à l'heure, se montrent d'accord avec les données des schemas numériques qu'on peut facilement dresser pour ces endroits.

Enfin, les moyennes de Pawlowsk, Pétersbourg et surtout celles d'Ekatérinenbourg sont, en général, beaucoup plus élevées que les valeurs analogues pour Modena et pour Varsovie, exprimées en gr. cal.

---

## CHAPITRE ONZIÈME

Sur les sommes de la chaleur, en gr. cal.

### § 55. Valeurs de l'insolation et « constante solaire »

Le complément naturel des données et des discussions, dont nous nous sommes occupés jusqu'à présent, consisterait dans l'évaluation, même approximative, des valeurs de l'insolation pour Varsovie, ces dernières valeurs exprimant les sommes de la chaleur qu'un centimètre carré du sol reçoit du soleil, au cours de l'année. Pour les déterminer, il faut connaître deux valeurs : l'intensité du rayonnement et la durée de l'insolation. La première s'obtient au moyen des mesures pyréliométriques ou actinométriques converties en gr. cal. ; la seconde est fournie par les indications d'un héliographe.

Si la valeur de l'énergie rayonnante, arrivant à la limite de notre atmosphère, était connue et si l'absorption des rayons solaires pendant leur traversée dans les couches atmosphériques n'avait pas lieu, le calcul des sommes de l'énergie, fournie, p. ex. pendant une journée sur l'unité de surface, ne présenterait pas trop de difficulté. En effet, en désignant par  $Q$  l'intensité du rayonnement, par  $C$  la constante solaire, par  $r$  la distance de la terre, par  $h$  la hauteur du soleil, on aurait

$$dQ = \frac{C}{r^2} \cdot \sin h \cdot dt \quad (159)$$

où

$$\sin h = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t \quad (160)$$

d'après la relation connue du triangle parallactique.

Pour trouver la valeur de  $Q$ , p. ex. pour une journée entière, il faudrait calculer l'intégrale

$$Q = C. \int_{-t_o}^{+t_o} \frac{\sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cdot \cos t}{r^2} dt \quad (161)$$

où les limites correspondent aux moments du lever et du coucher du soleil et doivent être calculées d'avance au moyen de la formule

$$\sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t_o = 0 \quad (162)$$

où

$$\cos t_o = - \operatorname{Tg} \lambda \operatorname{Tg} \delta \quad (163)$$

Le calcul de l'intégrale (161) pourrait présenter des difficultés, plutôt d'ordre mathématique; pour la météorologie, quand il s'agit d'évaluer la somme, p. ex. pour la période d'une journée, il suffit d'admettre que les valeurs de  $\delta$  (déclinaison) et de  $r$  restent invariables pendant ce temps. En négligeant la réfraction, on aura donc, au lieu de (161), la formule

$$Q = \frac{2C}{r^2} \cdot (\sin \lambda \sin \delta \cdot t_o + \cos \lambda \cos \delta \cdot \sin t_o) \quad (164)$$

valable pour la période d'un jour.

Des calculs semblables ont été faits à plusieurs reprises; M. Angot les a généralisés pour le cas d'absorption des rayons solaires par l'atmosphère terrestre. Quoique les conclusions obtenues par tous ces savants soient, sans aucun doute, d'un très haut intérêt, les résultats de ces calculs sauront difficilement trouver une application plus complète dans la physique de l'atmosphère jusqu'à ce que la valeur de la « constante solaire » soit réalisable.

Or, la difficile question de cette « constante » reste ouverte

jusqu'ici, malgré les grands efforts d'un nombre considérable de savants qui ont tenté de la déterminer et ont même parfois cru l'avoir trouvée.

Il semble cependant que les méthodes, dont on s'est servi pour arracher à la nature une de ses principales constantes, soient, à priori, peu susceptibles de donner la réponse exacte à la question posée.

La première méthode qu'on a employée est la suivante. En exécutant les mesures dans un endroit donné pour les hauteurs variables  $h$  du soleil ou, ce qui revient au même, pour les divers chemins  $z$  parcourus par les rayons solaires dans l'atmosphère, on peut obtenir les valeurs et les changements de l'absorption dans l'intervalle observé. En reliant les variations de  $Q$  et de  $z$ , ainsi obtenues, au moyen de formules plus ou moins probables et plus ou moins compliquées, on a cru pouvoir les appliquer aussi pour le cas de  $z=0$ , c. à d. pour la limite de l'atmosphère. On oubliait donc que la relation avait été établie d'après les mesures faites dans un intervalle très limité, qu'elle avait un caractère empirique et qu'une telle extrapolation, pour bien d'autres raisons encore, ne serait point admissible.

Plus rationnelle était la seconde méthode, laquelle se base sur les expéditions de montagnes pour évaluer l'action absorbante des couches atmosphériques. Mais, malgré cette extension de l'intervalle exploré, les objections précédentes s'y font, quand même, valoir: il n'existe pas de raisons scientifiques prouvant que le caractère de l'absorption atmosphérique reste strictement le même dans toutes les altitudes.

M. Ångström, dans son travail bien connu «Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes» (Upsala, 1900), indique, au contraire, que le caractère de l'absorption du rayonnement solaire est différent dans les diverses couches de l'atmosphère.

§ 56. *Sur le calcul des sommes de la chaleur qui serait reçue à la surface du sol, à Varsovie, si le ciel était constamment dégagé.*

Pour l'évaluation des sommes de la chaleur, on peut se servir de la méthode suivante. Les mesures directes nous donnent (au moins pour un certain nombre de jours au cours de l'année) les variations diurnes et mensuelles de la radiation  $Q$ , avec la hauteur du soleil  $h$ . Nous pouvons donc, chaque fois, établir la relation

$$Q = f(h) \quad (165)$$

laquelle par substitution

$$\sin h = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t \quad (160 \text{ bis})$$

peut être, pour  $\lambda$  et  $\delta$  donnés, ramenée à la forme

$$Q = \varphi(t) \quad (166)$$

En prenant l'intégrale

$$- \int_{t_0}^{+t_0} \varphi(t) dt \quad (167)$$

dont les limites se trouvent d'après la formule

$$\cos t_0 = - \operatorname{Tg} \lambda \operatorname{Tg} \delta \quad (163 \text{ bis})$$

on arrive à établir la somme diurne cherchée, en s'appuyant sur les mesures de l'intensité du rayonnement et sur la durée de l'insolation dans la période considérée.

Il s'agit seulement de présenter la fonction  $\varphi(t)$  de la manière la plus simple possible et la plus commode afin que le calcul de l'intégrale (167) puisse être facilement effectué.

Avant de commencer le calcul des sommes de la chaleur réellement reçue, posons d'abord la question suivante. Quelle quantité de chaleur arriverait à la surface terrestre à Varsovie (sur l'unité de surface normalement exposée), si le ciel était

constamment dégagé, c.-à-d. si la durée de l'insolation était continue, depuis le lever jusqu'au coucher du soleil ? Il est facile de voir que cette condition n'est pas encore identique à celle de la nébulosité  $O$  ou à celle d'une transparence constante du ciel.

Étant donné qu'il s'agit ici non de quantités théoriquement les plus grandes, mais de quantités moyennes, qui pourraient arriver à la surface du sol, à Varsovie, si le ciel était constamment dégagé, prenons le résumé annuel moyen (voir Tab. XVI), établi pour les cinq années 1901-1905, en excluant la période de la dépression. Les valeurs moyennes qui y figurent nous donnent les variations de  $Q$ , au cours de l'année, dépendant des valeurs de la hauteur du soleil (à midi vrai) dans chaque mois.

Ce procédé fut précisément appliqué à Varsovie. En représentant graphiquement la marche annuelle de l'intensité du rayonnement (en traçant sur l'axe des ordonnées les valeurs de l'intensité en gr. cal. et sur l'axe des abscisses les hauteurs du soleil en degrés), on peut établir, pour chaque jour, la valeur moyenne correspondante de l'intensité, d'après sa hauteur à midi vrai et sa position dans la courbe annuelle. Ces données ont été établies, pour Varsovie, pour le 10, 20 et 30 de chaque mois (en février pour le 28); elles sont représentées dans la dernière colonne (pour 12<sup>h</sup>) de la Tab. XXII.

(Voir Tab. XXII, p. 172).

De cette manière, on a obtenu les valeurs moyennes de l'intensité, pour le midi vrai des divers jours de l'année; dans le but de déduire les variations diurnes du rayonnement, on a calculé encore les valeurs horaires. Pour arriver à celles-ci, on a trouvé d'abord les hauteurs du soleil à Varsovie pour le commencement des heures successives du 10, 20 et 30 de

Table XXII. — *Valeurs horaires de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie (d'après les valeurs mensuelles moyennes dans la période 1901-1905, excepté les 15 mois de la dépression).*

| Date     | 4 <sup>h</sup> a<br>8 <sup>h</sup> p | 5 <sup>h</sup> a<br>7 <sup>h</sup> p | 6 <sup>h</sup> a<br>6 <sup>h</sup> p | 7 <sup>h</sup> a<br>5 <sup>h</sup> p | 8 <sup>h</sup> a<br>4 <sup>h</sup> p | 9 <sup>h</sup> a<br>3 <sup>h</sup> p | 10 a<br>2 <sup>h</sup> p | 11 <sup>h</sup> a<br>1 <sup>h</sup> p | 12 <sup>h</sup> |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| 10. I    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.449                                | 0.702                    | 0.810                                 | 0.841           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.513                                | 0.731                    | 0.824                                 | 0.851           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.638                                | 0.826                    | 0.903                                 | 0.927           |
| 10. II   | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.461                                | 0.800                                | 0.941                    | 1.007                                 | 1.028           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.663                                | 0.901                                | 1.015                    | 1.074                                 | 1.092           |
| 28. "    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.738                                | 0.927                                | 1.034                    | 1.089                                 | 1.107           |
| 10. III  | —                                    | —                                    | —                                    | 0.430                                | 0.823                                | 0.966                                | 1.060                    | 1.112                                 | 1.127           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.595                                | 0.877                                | 1.004                                | 1.090                    | 1.133                                 | 1.146           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.700                                | 0.919                                | 1.039                                | 1.115                    | 1.151                                 | 1.162           |
| 10. IV   | —                                    | —                                    | 0.413                                | 0.783                                | 0.959                                | 1.069                                | 1.135                    | 1.168                                 | 1.180           |
| 20. "    | —                                    | "                                    | 0.550                                | 0.832                                | 0.983                                | 1.082                                | 1.138                    | 1.169                                 | 1.180           |
| 30. "    | —                                    | "                                    | 0.644                                | 0.860                                | 0.995                                | 1.082                                | 1.133                    | 1.162                                 | 1.172           |
| 10. V    | —                                    | 0.263                                | 0.694                                | 0.882                                | 1.008                                | 1.085                                | 1.131                    | 1.157                                 | 1.165           |
| 20. "    | —                                    | 0.388                                | 0.719                                | 0.885                                | 1.002                                | 1.073                                | 1.119                    | 1.143                                 | 1.149           |
| 30. "    | —                                    | 0.431                                | 0.723                                | 0.881                                | 0.993                                | 1.061                                | 1.106                    | 1.127                                 | 1.133           |
| 10. VI   | "                                    | 0.461                                | 0.726                                | 0.877                                | 0.984                                | 1.032                                | 1.095                    | 1.114                                 | 1.120           |
| 20. "    | "                                    | 0.462                                | 0.727                                | 0.878                                | 0.985                                | 1.034                                | 1.097                    | 1.116                                 | 1.122           |
| 30. "    | "                                    | 0.476                                | 0.741                                | 0.892                                | 0.999                                | 1.067                                | 1.110                    | 1.129                                 | 1.136           |
| 10. VII  | "                                    | 0.454                                | 0.750                                | 0.908                                | 1.019                                | 1.087                                | 1.131                    | 1.151                                 | 1.157           |
| 20. "    | "                                    | 0.430                                | 0.746                                | 0.914                                | 1.028                                | 1.097                                | 1.142                    | 1.164                                 | 1.170           |
| 30. "    | —                                    | 0.310                                | 0.689                                | 0.874                                | 0.998                                | 1.074                                | 1.123                    | 1.148                                 | 1.155           |
| 10. VIII | —                                    | "                                    | 0.612                                | 0.831                                | 0.964                                | 1.048                                | 1.098                    | 1.126                                 | 1.135           |
| 20. "    | —                                    | "                                    | 0.507                                | 0.784                                | 0.929                                | 1.026                                | 1.080                    | 1.112                                 | 1.122           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | 0.402                                | 0.755                                | 0.921                                | 1.030                                | 1.091                    | 1.124                                 | 1.135           |
| 10. IX   | —                                    | —                                    | "                                    | 0.708                                | 0.911                                | 1.029                                | 1.103                    | 1.139                                 | 1.152           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.608                                | 0.867                                | 0.992                                | 1.080                    | 1.121                                 | 1.134           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.457                                | 0.803                                | 0.941                                | 1.034                    | 1.084                                 | 1.099           |
| 10. X    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.398                                | 0.781                                | 0.924                                | 1.017                    | 1.044                                 | 1.058           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.670                                | 0.863                                | 0.966                    | 0.993                                 | 1.011           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.552                                | 0.784                                | 0.902                    | 0.932                                 | 0.953           |
| 10. XI   | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.621                                | 0.798                    | 0.875                                 | 0.898           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.549                                | 0.758                    | 0.851                                 | 0.876           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | "                                    | 0.485                                | 0.730                    | 0.838                                 | 0.868           |
| 10. XII  | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.427                                | 0.706                    | 0.823                                 | 0.860           |
| 20. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.400                                | 0.700                    | 0.820                                 | 0.855           |
| 30. "    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | —                                    | 0.410                                | 0.696                    | 0.815                                 | 0.846           |

N. B. — Les traits placés dans les colonnes signifient que, pour le commencement de l'heure indiquée, la hauteur du soleil était déjà négative, tandis que le signe » veut dire que la hauteur, dans ce moment, étant positive, n'a pas encore atteint 5°.

chaque mois ; d'où en se servant des valeurs de réduction à la hauteur, à Varsovie, on a calculé toutes les valeurs horaires de l'intensité de rayonnement.

Ces dernières sont indiquées dans la Tab. XXII, à côté des données pour le midi vrai que nous avons discutées tout à l'heure. Ajoutons que, comme première heure de l'insolation, on a compté celle au commencement de laquelle la hauteur du soleil était égale au moins à 5 degrés.

Les réductions, pour les hauteurs du soleil trop basses, étant peu certaines et les valeurs de l'intensité  $y$  étant très petites, ce choix paraît justifiable ; et cela d'autant plus que l'omission de quelques minutes au lever et au coucher du soleil n'entraîne pas des changements trop considérables dans la somme de la chaleur, au moins dans ce degré d'approximation qui est réalisable dans l'état actuel de cette question.

Puis, étant donné que les valeurs horaires dépendent — dans la Tab. XXII — seulement des variations dans la hauteur du soleil, on a réuni dans les colonnes communes les valeurs pour les heures correspondantes d'avant ou d'après midi, comme cela est d'ailleurs indiqué en tête des colonnes. On néglige donc les variations de la déclinaison dans un jour donné, ce qui ne peut entraîner que rarement une différence dépassant 0°1.

Les valeurs horaires étant obtenues, il faut en faire le total pour arriver aux sommes diurnes et puis aux sommes mensuelles et annuelles de la chaleur.

Cette addition s'effectue de telle manière que chaque valeur horaire de la radiation, calculée pour le commencement de l'heure indiquée, est considérée comme moyenne pour les 30 minutes qui la précèdent et qui la suivent.

Quant à la valeur du midi, elle se rapporte à l'intervalle de 11<sup>h</sup>30<sup>m</sup> $\alpha$  à 12<sup>h</sup>30<sup>m</sup> $\rho$  ; pour obtenir la moyenne correspondant à cet intervalle, il faut prendre la valeur à 11<sup>h</sup>45<sup>m</sup> $\alpha$  ou à

12<sup>h</sup>15<sup>m</sup>μ. Cependant, par suite de petits changements de la hauteur autour de midi, on a pu, dans la plupart des cas, prendre directement la hauteur du midi, comme moyenne.

De cette façon, on a obtenu, pour le 10 février, p. ex., un nombre de 446,580 (après l'avoir multiplié par 60) ou 447. La suppression de la partie fractionnaire dans ce nombre n'est que trop justifiée par le caractère approximatif du calcul.

Ces sommes diurnes, calculées dans les intervalles de dix jours, sont données dans la Tab. XXIII; possédant ces sommes diurnes et en les interpolant dans les intervalles choisis, on obtient sans difficulté les sommes mensuelles.

Ces dernières se trouvent indiquées dans la dernière ligne des colonnes correspondantes et sont ramenées aux centaines entières de calories.

Table XXIII. — *Sommes de la chaleur pour Varsovie, le ciel étant constamment dégagé (d'après les valeurs mensuelles moyennes de l'intensité du rayonnement solaire en 1904-1905).*

| Mois<br>(jours) | I<br>(34) | II<br>(28)           | III<br>(34) | IV<br>(30) | V<br>(34) | VI<br>(30) | VII<br>(34) | VIII<br>(34) | IX<br>(30) | X<br>(34) | XI<br>(30) | XII<br>(34) |
|-----------------|-----------|----------------------|-------------|------------|-----------|------------|-------------|--------------|------------|-----------|------------|-------------|
| S pour le 10    | 286       | 447                  | 595         | 734        | 816       | 824        | 849         | 750          | 656        | 563       | 329        | 286         |
| » » » 20        | 299       | 504                  | 633         | 764        | 828       | 826        | 853         | 720          | 628        | 480       | 342        | 282         |
| » » » 30        | 340       | 520 <sup>(1)</sup>   | 661         | 775        | 827       | 838        | 845         | 707          | 584        | 438       | 298        | 284         |
| Sommes mens.    | 9000      | 13000 <sup>(1)</sup> | 18900       | 22200      | 25300     | 24800      | 26100       | 22900        | 19200      | 15900     | 10100      | 8800        |

La somme pour les mois d'hiver (XII, I, II) est égale à

(1) La dernière valeur pour le mois de février se rapporte au 28; pour les années bissextiles, la somme pour février, ainsi que la somme pour l'année entière doit être augmentée de 500.

30800 gr. cal.; pour les mois de printemps (III, IV, V): 66400 ; pour les mois d'été (VI, VII, VIII) : 73800 ; pour les mois d'automne (IX, X, XI) : 45200. Total pour l'année : 216200 gr. cal. au  $\text{cm}^2$  de la surface exposée normalement au rayonnement solaire.

On voit par là qu'à Varsovie plus de 200000 gr. cal. pourraient arriver, par année, au  $\text{cm}^2$  de la surface exposée normalement, si le ciel était constamment dégagé. Ajoutons que si cette somme présente une valeur maximum, cela tient uniquement à ce que la durée de l'insolation était supposée comme constante pendant tout le temps compris entre le lever et le coucher du soleil.

§ 57. *Sur le calcul du composant vertical de la chaleur, pour Varsovie.*

Toutes les données, dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent, expriment les quantités de la chaleur déversée par le soleil sur chaque centimètre carré d'une surface exposée normalement. L'angle d'incidence étant en réalité, pour la surface du sol, plus ou moins aigu, il importe de déterminer la partie du rayonnement reçu perpendiculairement par le sol horizontal. Pour cela, il faut multiplier toutes les valeurs horaires (voir Tab. XXII, p. 172) par  $\sin h$ , c.-à.-d. par le sinus de la hauteur, correspondant au temps donné. D'après ces nouvelles valeurs horaires, on a calculé les sommes diurnes, mensuelles et annuelles par un procédé identique à celui que nous avons employé plus haut.

(Voir Tab. XXIV, p. 176)

Table XXIV. — *Sommes du composant vertical de la chaleur pour Varsovie, le ciel étant constamment dégagé.*

| Mois<br>(jours)  | I<br>(31) | II<br>(28)         | III<br>(31) | IV<br>(30) | V<br>(31) | VI<br>(30) | VII<br>(31) | VIII<br>(31) | IX<br>(30) | X<br>(31) | XI<br>(30) | XII<br>(31) |
|------------------|-----------|--------------------|-------------|------------|-----------|------------|-------------|--------------|------------|-----------|------------|-------------|
| S. V. pour le 10 | 60        | 433                | 243         | 381        | 485       | 520        | 531         | 446          | 336        | 222       | 93         | 56          |
| » » » » 20       | 71        | 472                | 287         | 421        | 503       | 524        | 523         | 407          | 294        | 177       | 76         | 53          |
| » » » » 30       | 93        | 200 <sup>1)</sup>  | 330         | 455        | 514       | 530        | 488         | 376          | 248        | 140       | 70         | 54          |
| S. V. mensuelles | 2100      | 4100 <sup>1)</sup> | 8400        | 12000      | 15300     | 15700      | 16100       | 13200        | 9400       | 6400      | 2700       | 1700        |

Sommes pour les quatre saisons : hiver — 7900, printemps — 35700, été — 45000, automne — 18200. Total pour l'année : 106800 gr. cal. au cm<sup>2</sup> du sol horizontal.

On voit, d'après cette table, que plus de 100000 gr. cal. pourraient arriver, par année, sur 1 cm<sup>2</sup> du sol horizontal, à Varsovie, si le ciel était constamment dégagé. Par rapport aux données de la Tab. XXIII, la diminution de la somme annuelle est de 50 pour cent ; elle atteint même 75 pour cent dans les mois d'hiver.

§ 58. *Durée de l'insolation et sommes de la chaleur réellement reçue à Varsovie, en 1903, 1904 et 1905.*

Passons maintenant au calcul des sommes réelles de la chaleur, en prenant en considération la durée de l'insolation et la distribution des heures du soleil. Si, d'après les

---

(1) La dernière valeur pour le mois de février se rapporte au 28 ; pour les années bissextiles, la somme pour février, ainsi que la somme pour l'année entière, doit être augmentée de 200.

indications d'un héliographe, cette durée, pendant l'heure considérée, est égale à la fraction  $k$ , il faut additionner les produits horaires  $k Q$ , c.-à-d. calculer les sommes  $\Sigma k_i Q_i$  et, pour le composant vertical,  $\Sigma k_i Q_i \sin h_i$ , où la somme doit être prise, chaque fois, pour la période du lever au coucher du soleil.

On voit par là que, pour ces calculs, il est nécessaire d'évaluer d'abord les nombres  $k_i$ , c.-à.-d. la durée et la distribution des heures du soleil. Ces données ont été relevées, pour les années 1903, 1904 et 1905, à l'aide des héliographes, installés à la Station Centrale Météorologique de Varsovie, tout près du lieu où s'effectuent les mesures de la radiation solaire. Ajoutons qu'en 1903, les données se rapportent à un héliographe du système photographique, tandis que, dans les années suivantes, elles ont été obtenues à l'aide d'un héliographe Campbell.

De cette manière, on a trouvé : en 1903 — 1245 heures; en 1904 — 1791 et en 1905 — 1563, comme durée de l'insolation. Les sommes mensuelles présentent, en général, un accroissement constant jusqu'au mois de juillet, les valeurs les plus petites de la durée de l'insolation se montrant à la fin de l'année. En 1903 et en janvier et février 1904, c.-à.-d. pendant la période de la dépression du rayonnement, les sommes en question présentent aussi un abaissement assez considérable.

En prenant provisoirement le nombre de 3550 heures, comme un maximum de la durée possible de l'insolation, à Varsovie (laquelle peut être enregistrée par les héliographes du système employé), on obtient ce résultat que la durée réelle a été, en 1903, égale à 35 pour cent de la durée maximum possible ; en 1904, on trouve 50 pour cent et en 1905 — 44 pour cent de la même durée.

En ce qui concerne la période diurne, remarquons que

dans les sommes annuelles la plus grande durée de l'insolation tombe dans la période de 11<sup>h</sup>*a* à midi et que les variations du nombre des heures du soleil ne sont pas, en général, considérables entre 9<sup>h</sup>*a* et 3<sup>h</sup>*p*.

Enfin, il y a, à Varsovie, 250 jours environ, au cours de l'année, qui présentent des traces dans les courbes héliographiques.

En possession de tous les  $k_i$  nécessaires, nous pouvons aborder les calculs des sommes réelles de la chaleur à Varsovie. Pour arriver aux sommes mensuelles, il faut prendre les doubles sommes de la forme

$$60. \sum \sum k_i Q_i \quad (168)$$

et pour le composant vertical

$$60. \sum \sum k_i Q_i \sin h_i \quad (169)$$

pour toutes les heures à partir du lever jusqu'au coucher du soleil et, ensuite, pour tous les jours d'un mois considéré.

Les valeurs de  $k_i$  ont été relevées des courbes héliographiques, les valeurs de  $\sin h_i$  ont été trouvées pour le commencement de chaque heure d'après les tables astronomiques et, enfin, les valeurs de  $Q_i$  — d'après les mesures directes de l'intensité du rayonnement solaire. Pour faciliter ces longs calculs, on a divisé les jours de chaque mois en groupes composés de 10 ou 5 (6) jours; en outre, on s'est servi de la méthode qu'on a employée pour calculer les sommes de la chaleur au § 56, en commençant (ou en finissant) par les heures où la hauteur du soleil n'était pas inférieure à 5°.

Soulignons ce fait que les valeurs de  $Q_i$ , pour midi de chaque groupe, ont été prises non d'après les moyennes mensuelles des résumés annuels (voir Tab. XIII), mais d'après les mesures directes (in extenso) dans la période considérée sans excepter aucun jour d'observation.

De plus, ce qui est important, on a pris dans chaque

groupe, comme valeurs du midi, non les valeurs diurnes (les plus grandes parmi les valeurs mesurées dans un jour donné), comme cela a été fait pour le calcul des moyennes mensuelles, mais les moyennes directes d'après les mesures effectuées pendant la période de  $11^{\text{h}}30^{\text{m}}a$  à  $12^{\text{h}}30^{\text{m}}p$ .

Tout cela a été fait pour se rapprocher, autant que possible, des conditions réelles de la marche diurne et annuelle de la radiation solaire.

Ayant obtenu la valeur de  $Q$  à midi vrai, on a établi — d'après les réductions habituelles à la hauteur du soleil, à Varsovie — les  $Q$  correspondants pour le commencement de toutes les autres heures du jour. Ces données, considérées comme moyennes pour les intervalles les plus rapprochés de 60 minutes, ont servi pour former les produits  $k_i Q_i$ , en réunissant les heures correspondantes d'avant et d'après midi.

(Voir Tab. XXV. p. 180)

Les nombres cités dans les colonnes portant en tête « $^0/0$ » désignent le pour cent des sommes réellement reçues, par rapport aux sommes théoriquement possibles (Tab. XXIII et XXIV). Pour les sommes annuelles de la durée de l'insolation (en heures) et de la chaleur (en gr. cal.), les pour cent en question sont assez rapprochés.

Les sommes mensuelles de la chaleur, surtout celles du composant vertical, donnent la marche qui correspond aux variations de la hauteur du soleil, au cours de l'année. Parmi les différentes saisons, c'est la période d'été, qui est caractérisée par le plus grand nombre de gr. cal.; les mois du printemps viennent ensuite.

Enfin, l'année 1903 présente un déficit considérable, en ce qui concerne les sommes de la chaleur, par rapport aux années 1904 et 1905.

Table XXV. — *Sommes de la chaleur réellement reçue à Varsovie (1903, 1904, 1905)*

| ANNEE | MOIS                 | I    | II   | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI   | XII  |
|-------|----------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 1903  | ΣΣ k (heures) .....  | 40.0 | 66.0 | 93.0  | 82.8  | 177.7 | 150.3 | 149.9 | 162.5 | 194.7 | 103.9 | 15.7 | 8.9  |
|       | 60. ΣΣ k Q .....     | 1400 | 2760 | 4310  | 4400  | 9070  | 9090  | 8150  | 8510  | 9880  | 5090  | 680  | 210  |
|       | 60. ΣΣ k Q Sin h ... | 360  | 940  | 2100  | 2620  | 6090  | 6290  | 5600  | 5410  | 5120  | 2140  | 180  | 40   |
| 1904  | ΣΣ k (heures) .....  | 38.7 | 32.5 | 146.4 | 130.3 | 231.7 | 271.7 | 311.6 | 265.7 | 187.5 | 99.2  | 44.8 | 30.5 |
|       | 60. ΣΣ k Q .....     | 1180 | 1290 | 8150  | 7090  | 13820 | 14680 | 17360 | 14160 | 10580 | 4900  | 2060 | 1120 |
|       | 60. ΣΣ k Q Sin h ... | 290  | 420  | 3800  | 3760  | 8630  | 9230  | 11310 | 8420  | 5410  | 2100  | 640  | 220  |
| 1905  | ΣΣ k (heures).....   | 79.0 | 58.4 | 39.3  | 122.2 | 263.3 | 268.3 | 248.9 | 237.4 | 125.4 | 65.5  | 27.7 | 27.5 |
|       | 60. ΣΣ k Q .....     | 3220 | 2690 | 2100  | 6300  | 15600 | 14410 | 15520 | 13540 | 7510  | 3100  | 1240 | 1120 |
|       | 60. ΣΣ k Q Sin h...  | 760  | 920  | 1020  | 4730  | 10010 | 9610  | 10380 | 7800  | 3850  | 1280  | 330  | 230  |

| Année                                         | Hiver    |    | Printemps |    | Eté      |    | Automne  |    | Total    |    | Durée de l'insol. |    |
|-----------------------------------------------|----------|----|-----------|----|----------|----|----------|----|----------|----|-------------------|----|
|                                               | gr. cal. | %  | gr. cal.  | %  | gr. cal. | %  | gr. cal. | %  | gr. cal. | %  | heures            | %  |
| A) Sur cm² de la surface exposée normalement. |          |    |           |    |          |    |          |    |          |    |                   |    |
| 1903                                          | 4370     | 14 | 17980     | 27 | 25750    | 35 | 15650    | 35 | 63750    | 30 | 1245              | 33 |
| 1904                                          | 3590     | 12 | 29060     | 44 | 46200    | 63 | 17540    | 39 | 96390    | 45 | 1791              | 50 |
| 1905                                          | 7030     | 23 | 24000     | 37 | 43470    | 59 | 11850    | 26 | 86350    | 40 | 1563              | 44 |
| B) Sur cm² du sol horizontal.                 |          |    |           |    |          |    |          |    |          |    |                   |    |
| 1903                                          | 1340     | 17 | 10810     | 30 | 17300    | 38 | 7440     | 41 | 36890    | 35 |                   |    |
| 1904                                          | 930      | 12 | 16190     | 43 | 28960    | 64 | 8150     | 45 | 54230    | 51 |                   |    |
| 1905                                          | 1910     | 24 | 15760     | 44 | 27790    | 62 | 5460     | 30 | 50920    | 48 |                   |    |

Toutes les sommes données dans la Tab. XXV ont été ramenées aux dizaines entières de calories; leur caractère approximatif consiste surtout en ce qu'on n'a pas pris en considération les oscillations individuelles du rayonnement solaire dans chaque jour; on a admis l'existence d'une période diurne moyenne (égale pour les heures équidistantes de midi), d'après les valeurs de réduction à la hauteur du soleil, déduites des mesures directes.

Quoiqu'il semble difficile d'évaluer les limites des erreurs qui peuvent s'introduire dans les sommes calculées de la chaleur, à cause de cette approximation, certaines raisons paraissent conduire à cette conclusion qu'on aura, pour les périodes suffisamment longues, une certaine compensation des écarts et qu'en général, l'admission de la marche diurne, d'après les réductions à la hauteur, tend plutôt à augmenter les sommes calculées de la chaleur.

Puis, pour le calcul de ces sommes, on a pris non tout le temps compris entre le lever et le coucher astronomique du soleil, mais la période précédant ou suivant, de 30 minutes, l'heure, au commencement de laquelle la hauteur du soleil était égale au moins à  $5^{\circ}$ . Pour les sommes du composant vertical, le facteur négligé est sans importance, car il n'atteint même pas une dizaine de calories dans la somme mensuelle. Quant aux sommes  $\Sigma \Sigma k Q$ , le facteur négligé peut y atteindre des valeurs un peu plus élevées, mais, même pour un mois d'été, il ne dépasse pas environ 1 pour cent de la somme calculée.

Cette omission de quelques minutes près du lever et du coucher du soleil était nécessaire non seulement à cause de la difficulté des réductions pour les hauteurs du soleil trop basses, mais aussi pour ne pas dépendre de la sensibilité des héliographes. Pour les mesures de Varsovie, on a trouvé que l'intensité de la radiation solaire à la hauteur de  $5^{\circ}$  est déjà

suffisamment grande, dans les conditions habituelles, pour donner des traces visibles, ce qui nous permet de ne pas nous occuper ici de l'examen détaillé des indications des appareils héliographiques de Varsovie.

Cette seconde source d'erreurs, dans les sommes calculées de la chaleur, a toujours le caractère négatif, c.-à-d. qu'elle tend à diminuer les sommes en question, tandis que la première source dont nous avons parlé tout à l'heure, paraît avoir une tendance contraire.

L'évaluation tout à fait exacte des sommes de la chaleur sera réalisable quand un pyréliomètre-enregistreur de précision pourra être mis en fonction.

§ 59. *Sommes de la chaleur, d'après les mesures faites à Treurenberg (Spitzberg).*

En se basant sur ses mesures pyréliométriques à Treurenberg, pendant l'expédition géodétique au Spitzberg (1899-1900), M. Westman a évalué les sommes mensuelles et annuelles pour cet endroit. Ces sommes sont indiquées dans la Tab. XXVI. Il est du plus grand intérêt de les comparer avec les données analogues trouvées pour Varsovie.

(Voir Tab. XXVI, p. 183)

La méthode de calcul appliquée pour Treurenberg étant basée sur les mêmes principes, les sommes de la chaleur, obtenues dans ces deux endroits, sont directement comparables entre elles. Remarquons qu'à Treurenberg, pendant le jour polaire, on a pu effectuer les mesures aussi bien à midi qu'à minuit et on a additionné chacune des vingt-quatre heures. Enfin, quant à la restriction sur la hauteur minimum pour le

Table XXVI. — *Sommes de la chaleur pour Treurenberg (1899/1900)*

| MOIS                    | II                  | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X    | XI |
|-------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| Sommes pour le 10.....  | —                   | 257   | 925   | 1452  | 1576  | 1601  | 1438  | 893   | 126  | —  |
| » » 20.....             | —                   | 476   | 1171  | 1500  | 1612  | 1550  | 1338  | 568   | —    | —  |
| » » 30.....             | 112<br>(pour le 28) | 647   | 1346  | 1543  | 1612  | 1506  | 1093  | 406   | —    | —  |
| Sommes mensuelles ..... | 200                 | 11700 | 31500 | 45700 | 47900 | 48600 | 41900 | 21800 | 3000 | —  |

Somme pendant le jour polaire = 200200 ; pendant le reste de l'année = 52100.

Somme annuelle : 252300 gr. cal. par cm<sup>2</sup> de la surface exposée normalement, si le ciel était constamment dégagé.

| MOIS                       | II                | III  | IV   | V     | VI    | VII   | VIII  | IX   | X   | XI |
|----------------------------|-------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-----|----|
| Som. vert. pour le 10... . | —                 | 24   | 174  | 462   | 620   | 606   | 426   | 149  | 7   | —  |
| » » 20....                 | —                 | 71   | 283  | 528   | 649   | 559   | 331   | 89   | —   | —  |
| » » 30 ...                 | 4<br>(pour le 28) | 110  | 386  | 586   | 643   | 449   | 239   | 37   | —   | —  |
| Sommes mensuelles .....    | 10                | 1650 | 7200 | 15490 | 18980 | 17820 | 11340 | 3060 | 220 | —  |

Somme (composant vertical) pendant le jour polaire = 67840 ; pendant le reste de l'année = 7930.

Somme annuelle = 75770 gr. cal. par cm<sup>2</sup> du sol horizontal, si le ciel était constamment dégagé.

| MOIS<br>(ANNÉE)             | II<br>(1900) | III<br>(1900) | IV<br>(1900) | V<br>(1900) | VI<br>(1900) | VII<br>(1900) | VIII<br>(1899) | IX<br>(1899) | X<br>(1899) | XI<br>(1899) |
|-----------------------------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-------------|--------------|
| ΣΣ k (heures) .....         | 0            | 76            | 111          | 210         | 135          | 139           | 113            | 110          | 1           | 0            |
| 60. ΣΣ k Q (gr. cal.).....  | 0            | 3270          | 6170         | 13000       | 9130         | 9220          | 6620           | 6160         | 40          | 0            |
| 60. ΣΣ k Q Sin h (gr. cal.) | 0            | 480           | 1590         | 4440        | 3800         | 3540          | 1780           | 1190         | 0           | 0            |

Somme annuelle = 53610 gr. cal. par cm<sup>2</sup> de la surface norm. (21 %).

» » = 16820 gr. cal. par cm<sup>2</sup> du sol horizontal (22 %).

calcul des valeurs horaires, il n'y a pas, pour Treurenberg, d'indications spéciales sur ce sujet.

On voit, d'après la table XXVI, que la majeure partie de la radiation déversée par le soleil à Treurenberg est interceptée par les nuages. Des 252300 gr. cal. qui pourraient arriver par année, si le ciel était constamment dégagé, 53610 gr. cal. seulement (21 pour cent environ) arrivèrent réellement en 1899/1900 à la station de Treurenberg.

Pour les sommes du composant vertical, cette relation reste à peu près la même. Enfin, par suite de sa latitude élevée, le composant vertical n'y monte dans l'année qu'à 30 pour cent environ de la chaleur totale normalement incidente.

Remarquons qu'à Treurenberg, de même qu'à Varsovie, les nombres pour cent des sommes de la chaleur et de la durée de l'insolation (par rapport à leurs valeurs maxima possibles) sont très rapprochés.

§ 60. *Données pour Montpellier et résumé des sommes de la chaleur.*

Outre Varsovie et Treurenberg, les sommes en question furent aussi calculées pour Montpellier, où, comme l'on sait, les mesures régulières de l'intensité ont été faites, pendant la période 1883-1900, au moyen de l'actinomètre du système Crova. Les résultats de ces calculs furent publiés par M. Houdaille (Bull. mét. de l'Hérault, 1899), lequel s'est servi d'une méthode tout à fait différente de celle qui a été employée pour Varsovie et Treurenberg. M. Houdaille a appliqué les tables des sommes théoriques données par M. Angot, en admettant pour la constante solaire la valeur de 2,4 gr. cal. Ajoutons que la durée de l'insolation — le facteur le plus

influent pour ces sommes — a été relevée, à Montpellier, à l'aide d'un héliographe Campbell.

Indiquons ici, pour Montpellier, les valeurs moyennes, pour la période 1883-1889, de la durée de l'insolation et des sommes de la chaleur.

|                                                             | Hiver | Printemps | Été   | Automne | Année |
|-------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------|---------|-------|
| Durée de l'insolation (heures).....                         | 345   | 593       | 859   | 473     | 2270  |
| Sommes de la chaleur<br>(surf. horizontale) en gr. cal..... | 8100  | 21500     | 28550 | 13650   | 71800 |

Dans la moyenne, un centimètre carré du sol horizontal reçoit, à Montpellier, un peu plus de 70000 gr. cal. pendant l'année, ce qui suffirait à fondre 8,97 m. de glace ou à évaporer une couche d'eau de 0,83 m. à la température de 15°.

Si le ciel était constamment dégagé, on aurait, à Montpellier, — d'après les calculs de M. Houdaille — 145000 gr. cal. environ. Les sommes réelles donnent donc, en moyenne, 51 pour cent des valeurs théoriquement possibles.

Des tables dressées par M. Houdaille (l. c.), on voit également que les sommes annuelles oscillent dans des limites assez étendues, de 60000 à 85000 gr. cal. pendant la période 1883-1889.

Enfin, nous comparons, dans la Tab. XXVII, les sommes précédemment établies pour Treurenberg, Varsovie et Montpellier.

Table XXVII.— *Sommes de la chaleur, pour Treurenberg, Varsovie et Montpellier.*

|                             | Lat-<br>géogr. | Durée de l'insol. |        |     | Sommes<br>(cm <sup>2</sup> de la surf. norm.) |         |     | Sommes<br>(cm <sup>2</sup> du sol horizontal) |         |     |
|-----------------------------|----------------|-------------------|--------|-----|-----------------------------------------------|---------|-----|-----------------------------------------------|---------|-----|
|                             |                | Q                 | heures | °/° | possibles                                     | réelles | °/° | possibles                                     | réelles | °/° |
| Treurenberg (1899/1900)...  | 79°9           | 895               | 21     | —   | 252300                                        | 53640   | 21  | 75770                                         | 46820   | 22  |
| Varsovie (1905).....        | 52°2           | 4563              | 44     | —   | 246200                                        | 86350   | 40  | 406800                                        | 50920   | 48  |
| Montpellier (1883-1889).... | 43°6           | 2270              | —      | —   | —                                             | —       | —   | 445000                                        | 71820   | 51  |

Ces résultats, très intéressants sans doute, sont cependant trop peu nombreux et aussi peu comparables (surtout à cause du non-synchronisme des périodes de temps) pour nous permettre d'en tirer des conclusions plus précises. Remarquons pourtant que, pour la surface normalement exposée, Treurenberg recevrait plus de chaleur que Varsovie, si le ciel était constamment dégagé; les sommes de la chaleur réellement reçue croissent cependant avec la latitude, par suite de la diminution successive de l'obliquité des rayons ainsi que de l'augmentation de la durée de l'insolation.

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

Une bibliographie très complète des travaux sur la radiation solaire, depuis le commencement (1693) jusqu'en 1887, se trouve dans :

- a) *Bibliography of Meteorology*. A classed catalogue of the printed literature of meteorology from the origin of printing to the close of 1881 ; with a supplement to the close of 1887, and an autor index. Prepared under the direction by A. W. Greely ; edited by Oliver L. Fassig. (Washington, Signal Office. 1889).

Les chapitres «solar radiation» et «terrestrial radiation» contiennent environ 300 mémoires.

De même, on trouvera des amples indications bibliographiques, suivies des exposés d'anciens travaux actinométriques, dans les ouvrages suivants :

- b) SCHMID. — *Lehrbuch der Meteorologie* (Leipzig, 1860).
- c) R. RADAU. — *Actinométrie*. Paris, 1877.
- d) CROVA. — Mesure de l'intensité calorifique des radiations solaires et de leur absorption par l'atmosphère terrestre. *Ann. de chim. et de phys.* 5<sup>e</sup> sér., t. XI, 1877.
- e) J. VIOLLE. — Sur la radiation. (Deuxième Congrès Météorologique International ; Rapport sur les questions du programme). 3<sup>me</sup> fascicule. Rome, 1879 ; — voir aussi J. VIOLLE, *Ann. chim. et phys.*, t. 10 (1877) ; t. 17 (1879).

- f)* REMEIS. — Die Strahlung und die Temperatur der Sonne. (Gaea, 1881).
- g)* S. LANGLEY. — Researches on solar heat and its absorption by the earth's atmosphere. Washington, 1884.
- h)* W. FERREL. — Recent Advances in Meteorology. (Annual Report of the Chief Signal Officer, Appendix 71; Washington, 1886).
- i)* O. CHWOLSON. — Ueber das gegenwärtige Zustand der Actinometrie. Wild's Repertorium für Meteorologie, t. 15. N. 1. 1892.

Pour les travaux actinométriques des dernières années, voir :

- j)* VIOLLE. — Rapport sur la radiation. (Rapports du Comité Météorologique International).
- k)* Catalogue of the International Scientific Literature. London.
- l)* Fortschritte der Physik (Abteilung «Kosmische Physik»).

Nous ne citerons ci-dessous, pour la période 1888-1905, que les principaux travaux contenant les résultats des mesures du rayonnement solaire ou les questions qui s'y rattachent directement. Ces travaux sont classifiés d'après les noms des auteurs.

#### 1888-1905

- 1) ABBOT C. G. — Recent studies of the solar constant of radiation. (Monthly Weather Review, T. 31, N. 12. 1903).
- 2) ÅNGSTRÖM KNUT. — Descriptions du pyrhéliomètre électrique dans les mémoires: Acta soc. scientiarum Upsalensis, 1893; The phys. Review, 1893; Annalen der Physik, 1899; Astrophysical Journal, 1899; Meteor. Zeit., 1901.
- Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes. (Nova Acta soc. sc. Upsalensis, 1900).
- Ueber die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. (Ann. d. Phys., 3, 1900).

- Ueber die Anwendung der elektrischen Kompensationsmethode zur Bestimmung der nächtlichen Ausstrahlung. (Nova Acta soc. sc. Upsalensis, 1903).
- 3) ASSMANN R. und BERSON A. — Die Sonnenstrahlung. (Wissenschaftliche Luftfahrten. Vieweg, 1900).
- 4) BARTOLI A. e STRACCIATI E. — Misure del calore solare fatte in Italia dal 1883 in poi (Acc. Gioenia di Catania, maggio, 1889; Nuovo Cimento, vol. XXIX; Bullettino di Moncalieri, sér. 2<sup>a</sup>, vol. XI).
- Misure actinometriche del raffreddamento notturno, eseguite sull'Etna. (Bull. Acc. Gioenia, dicembre, 1890).
- Misura della potenza chimica delle radiazioni solari. (Bull. Acc. Gioenia, dicembre, 1890).
- Formula empirica pel calore solare. (Atti Acc. Gioenia, tom. IV; Nuovo Cimento, 1892).
- Di alcune recenti misure calorimetriche ed in particolare della misura del calor solare. (Pavia, 1894).
- Sulla transmissibilità delle radiazioni solari attraverso l'atmosfera carica di cenere vulcanica nell'eruzione dell'Etna del 1892. (Atti dell'Accad. Gioenia, vol. VII, 1894; Nuovo Cimento 1894; Bull. di Moncalieri, 1894).
- Sull'assorbimento delle radiazioni solari dalla nebbia e dai cirri. (R. Istituto Lombardo, vol. XXVII, fasc. XV, 1894; Nuovo Cimento, 1894; Bull. della Società Meteorologica Italiana, Torino, 1894).
- Misure pireliometriche eseguite durante l'eclisse solare del 16 aprile 1893 (Atti della R. Acc. Gioenia, vol. VII, 1894; Nuovo Cimento, 1895).
- Studi pireliometrici fatti nel 1894 sullo Stelvio e loro confronto con quelli compiuti sull'Etna. (Rendiconti del R. Istit. Lombardo; ser. II, vol. XXVIII, 1895).

- 5) BENNETT S. R. — Actinometric observations of the solar eclipse.  
(Sc. Proc. Roy. Dublin Soc. 1900).
- 6) BUCHANAN J. — Solar calorimeter for eclipse observations. (Cambridge Phil. Soc. Trans. XI, 1901).
- Solar radiation. (Nature, London, t. 64, 1901).
- 7) CRISTONI CIRO. — Plusieurs mémoires (contenant les tables des mesures) dans «Rend. d. R. Acc. dei Lincei» (1902-1903).
- Sul pireliometro a compensazione elettrica dell' Ångström. (Ibidem., Roma, 1903).
- 8) CHWOLSON O. — Ueber das gegenwärtige Zustand der Actinometrie. (Repert. für Meteorologie, 1892).
- Actinometrische Untersuchungen, etc. (Ibidem, 1893).
- 9) CROVA A.
- N. B. — Pour les anciens travaux, ainsi que pour l'ensemble des recherches de ce savant, voir «Exposé des travaux scientifiques de A. CROVA» (Montpellier, 1900).
- Observations actinométriques faites en 1887 à l'Observatoire de Montpellier. (Mémoires de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, année 1888).
- Sur l'enregistrement de l'intensité calorifique de la radiation solaire. (Annales de chimie et de physique, 6<sup>e</sup> série, tome XIV, 1888).
- Etude de l'intensité calorifique de la radiation solaire au moyen de l'actinomètre enregistreur. (Ann. de chim. et de phys., 6<sup>e</sup> sér. t. XIV).
- Observations faites au sommet du Mont-Ventoux sur l'intensité calorifique de la radiation solaire, par MM. Crova et Houdaille. (Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CVIII, p. 35).
- Observations actinométriques faites en 1888 à l'Observatoire de

- Montpellier (avec 2 planches). (Mémoires de l'Acad. des Sciences et Lettres de Montpellier, 1889; voir aussi C. R., t. CVIII, p. 482).
- Observations faites au sommet du Mont-Ventoux sur l'intensité calorifique de la radiation solaire, par MM. Crova et Houdaille. (Ann. de chim. et de phys., 6<sup>e</sup> sér., t. XXI, 1890).
  - Sur le mode de répartition de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. (C. R., t. CVIII, p. 119; Volume du Congrès de Paris, 1<sup>re</sup> partie, p. 284, 1891).
  - Sur l'étalonnage des actinomètres. (Volume du Congrès de Paris, 1<sup>re</sup> partie, p. 285, 1891).
  - Communication faite à la Société météorologique de France, le 27 mai 1891, sur la corrélation entre l'intensité de la radiation solaire, la polarisation atmosphérique et la couleur bleue du ciel.
  - Déterminations actinométriques faites au Mont Blanc, en collaboration avec M. Houdaille. (C. R., t. CXXIII, p. 928).
  - Sur l'enregistrement de l'intensité calorifique de la radiation solaire. (C. R., t. CXXV, p. 804, 1897).
  - Observations actinométriques faites sur le Mont Blanc. Note de MM. Crova et Hansky. (C. R., t. CXXV, 1897).
  - Sur le pouvoir absorbant du noir de fumée, par MM. Crova et Compan. (C. R., t. CXXVI, p. 707, 1898).
  - Sur un actinomètre absolu. (C. R., t. CXXVI, p. 1394, 1898).
  - Note sur l'actinomètre à alcool. (Ann. de chim. et de phys., 6<sup>e</sup> sér., t. XVII, 1899).
  - Sur la constante solaire. (Rapport au Congrès international de physique, 1900).
- 10) DAVIS H. N. — Observations of solar radiation with the Ångström Pyrheliometer at Providence R. I. (Month. Weath. Rev. 3, 1903).

- 11) DUFOUR H. (et BUHRER C). — Plusieurs mémoires dans «Archives des sc. phys. et nat.» (Genève) et Bull. Soc. Vaud.  
— L'Insolation en Suisse. 2 parties. (Arch. des sc. phys. et nat., 107, 1903).
- 12) EKHOLM N. — Ueber die Emission und Absorption der Wärme etc. (Meteorologische Zeitschrift. 19. 1902).
- 13) EON L. — Intensité calorifique de la radiation solaire et durée de l'insolation à Montpellier. (Bull. mét. de l'Hérault. 1900).
- 14) EXNER F. — Messungen der Sonnenstrahlung und der nächtlichen Ausstrahlung auf dem Sonnblick. (Met. Zeitschrift. N. 9, p. 409, T. 20, 1903).
- 15) GORCZYNSKI WLAD. — Badania nad przebiegiem rocznym insolacyi. (Rozpr. Akad. Umiej. Kraków. 1903 ; Bull. intern., Cracovie, juillet 1903).  
— Sur la diminution de l'intensité du rayonnement solaire. (Compt. Rend. Paris. 1904).
- 16) GOUTEREAU CH. — Sur l'affaiblissement du rayonnement solaire en 1902-1903. (Ann. Soc. Météor. Paris. 1904).
- 17) HANSKY A. — Observations actinométriques au sommet du Mont Blanc en 1904. (Compt. Rend. Paris. 1905).
- 18) HOLM R. — Ueber die abnorm kleine Sonnenstrahlung in den Jahren 1902 and 1903. (Arkiv for Mat., Astr. och Fysik. Upsala. 1905).
- 19) HOMEN TH. — Der tägliche Wärmeumsatz im Boden und die Wärmestrahlung zwischen Himmel und Erde. Helsingfors. 1897.
- 20) HOUDAILE F. (voir aussi les travaux de M. GROVA). — Note sur une méthode d'évaluation approchée de la quantité de chaleur solaire, etc. Bull. mét. de l'Hérault. 1889).  
— Comparaisons actinométriques (Bull. mét. de l'Hérault. 1893).

- Influence de la radiation solaire sur l'évaporation (Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des sciences, 1889. Congrès de Paris).
- 21) KIMBALL H. — Abnormal variations in insolation. (Mont. Weat. Rev. 31. 5. 1903).
- Observations of solar radiation with the Ångström Pyrheliometer at Asheville and Black Mountain (*ibidem*, 31. 7. 1903).
- Variations in insolation and in the polarization of blue sky light during 1903 and 1904 (Proc. of the Third Conv. of Weath. Bureau. Washington. 1904).
- The variations in atmospheric transparency during 1902, 1903 and 1904 (Month. Weath. Rev. N. 3. 1905).
- 22) KNOTT C. G. — Solar radiation and earth temperatures. (Proc. Roy. Soc. Edinburgh. 1901 ; Month. W. Rev. 1903).
- 23) LANGLEY S. P. — Annales of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution. (Washington, 1900).
- The solar constant and related problems. (Astroph. Journal. 17. 1903).
- Variation of atmospheric absorption (Nature. 1903. 1904. London).
- On a possible variation of the solar radiation and its probable effect on terrestrial temperatures (Astroph. Journ. 19. 1904).
- 24) MARVIN C. F. — The measurement of Sunshine and the preliminary examination of Ångström's Pyrheliometer. (Mont. Weath. Rev. 29. 1901).
- 25) MELANDER G. — Ueber die Absorption der Atmosphäre. Helsingfors. 1901.
- 26) MULLER P. — Actinometer-Beobachtungen im Observatorium zu Katharinenburg. (Bull. de l'Acad. de St. Pétersbourg. 1899).

- 27) POYNTING J. H. — Radiation of the solar system, its effect on temperature and its pressure on small bodies. (Phil. Trans. of the Roy. Soc. of London. 202 (A). 525-552).
- 28) Results of the Actinometric observations made at the Royal Alfred Observatory from 1887-1897 (Proceeding and Transactions of the Meteorological Society of Mauritius. 1896-1900. Vol. I. New series, pp. 105-109; Mauritius, 1900).
- 29) RIZZO G. B. — Nuove Misure del calore solare. (Memorie della Società degli Spettroscopisti Italiani, vol. XXVI; Roma, 1897).
- Misure assolute del calore solare fatte alla Capanna Regina Margherita nel Monte Rosa. (Memorie della Società degli Spettroscopisti Italiani, vol XXVI ; 1897).
- Sopra le recenti misure della «costante solare» (Memorie della R. Accademia delle Scienze di Torino, ser. II, t. XLVIII ; Torino, 1898).
- Sopra il calcolo della costante solare (Atti della R. Accademia delle Scienze di Torino, vol. XXXVIII ; Torino, 1903).
- 30) SAVÉLIEFF. — Plusieurs notes dans «Ann. de chim. et de phys.»
- 31) SHAW. — Radiation in meteorology (Rep. Brit. Ass., London, 1902 ; Symon's Met. Mag. T. 37, 1902).
- 32) SCHUKEVITSCH. — Actinometrische Beobachtungen im Konstantinowschen Observatorium zu Pawlowsk. (Repertorium für Meteorologie, t. XVII. 1894).
- 33) SCHUSTER A. — Radiation through a foggy atmosphere. (Astroph. Journal. 21. 1903).
- 34) SMIRNOW D. — Ueber die Messungen der Strahlung mit Hilfe von Thermometern und einige Bestimmungen der Sonnenstrahlung in Tomsk. (Russ.) (St. Pétersbourg, Acad. Mém. 1904).
- 35) STANKEWITCH B. — Sur la constante solaire (Compt. Rend. t. 131, p. 879. Paris, 1900).

- 36) SUTTON J. R. — The influence of water-vapor upon nocturnal radiation. (Sc. Proc. Roy. Dublin. Soc. 11, 1905).
- 37) J. VALLOT. — Ann. de l'Obs. Mét. du Mont Blanc ; t. II. 1896.
- 38) VERY FRANK W. — Atmospheric Radiation. (Washington, 1900).
- The solar constant (Month. Weath. Rev. 29. N. 8).
- The absorptive power of the solar atmosphere. (The Astroph. Journ. 1902).
- 39) VIOLE J. — Rapport sur la radiation (périodiquement dans les publications du Comité Mét. Intern.).
- Mesures actinométriques effectuées pendant l'éclipse du 30 août 1905. (Compt. Rend. 141. 1905).
- 40) WESTMAN J. — Mesures de l'intensité de la radiation solaire faites en 1899 et en 1900 dans la baie de Treurenberg. (Stockholm, 1903).
- 41) WITKOWSKI A. — Spostrzezenia pyrheliometryczne w Zakopanem w lecie r. 1903. (Spraw. Kom. Fizyogr., Kraków, 1905).

---

Vu et permis d'imprimer :  
Montpellier, le 8 Octobre 1906.  
*Le Recteur,*  
ANT. BENOIST.

Vu et approuvé :  
Montpellier, le 4 Octobre 1906.  
*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*  
S. DAUTHEVILLE.



# TABLE DES MATIÈRES

---

|                                                                                                                                                                                                                       | Pages |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| INTRODUCTION .....                                                                                                                                                                                                    | III   |
| <b>Partie A.</b>                                                                                                                                                                                                      |       |
| Sur le degré de précision des mesures actinométriques et<br>pyrhéliométriques effectuées à Varsovie et sur la variabilité<br>du coefficient de transmission pour l'actinomètre du sys-<br>tème Ångström-Chwolson..... | 4-98  |
| CHAPITRE I. — Sur les méthodes statiques et dynamiques de<br>l'actinométrie et sur la déduction de la formule fonda-<br>mentale pour l'actinomètre du système Ångström-<br>Chwolson.                                  |       |
| § 1. Relation différentielle principale .....                                                                                                                                                                         | 3     |
| § 2. Intégration de l'équation et méthode stati-<br>que de l'actinométrie.....                                                                                                                                        | 7     |
| § 3. Méthodes dynamiques de l'actinométrie....                                                                                                                                                                        | 8     |
| § 4. Principe actinométrique d'Ångström et mé-<br>thode des intervalles de temps égaux de<br>Chwolson .....                                                                                                           | 11    |
| § 5. Simplification de la formule fondamentale<br>pour l'actinomètre du système Ångström-<br>Chwolson .....                                                                                                           | 12    |
| CHAPITRE II. — Modification de la théorie de l'actinomètre<br>et méthode des mesures employée à Varsovie.                                                                                                             |       |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 6. Remarques sur la construction des actinomètres du système Ångström-Chwolson.....              | 15 |
| § 7. Insuffisance de la théorie ancienne de l'actinomètre.....                                     | 16 |
| § 8. Modification de la formule fondamentale pour l'actinomètre du système Ångström-Chwolson ..... | 19 |
| § 9. Actinomètres employés à Varsovie .....                                                        | 23 |
| § 10. Méthode des mesures .....                                                                    | 24 |
| § 11. Sur les différences dues à l'application des formules simplifiées aux calculs.....           | 27 |

CHAPITRE III.— Sur les diverses sources d'erreurs de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson.

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 12. Sur les erreurs dues à l'application de la loi de Newton.....                                                                            | 31 |
| § 13. Sur les erreurs provenant des changements de la valeur de $h$ pendant une mesure..                                                       | 34 |
| § 14. Sur les erreurs dues à la non-parfaite égalité du coefficient $h$ pour les deux corps, par suite des différences de leurs températures.. | 37 |
| § 15. Sur les erreurs dues aux changements de la valeur de la radiation solaire pendant une mesure.....                                        | 42 |
| § 16. Sur les erreurs dues à la non-parfaite identité des deux corps actinométriques.....                                                      | 47 |
| § 17. Sur les erreurs provenant de l'influence inégale des sources secondaires de la chaleur sur chacun des deux corps actinométriques...      | 52 |
| § 18. Sur les erreurs dépendant des corrections des thermomètres actinométriques.....                                                          | 55 |

CHAPITRE IV. — Sur les erreurs d'observation et sur les erreurs accidentelles des valeurs relatives du rayonnement, d'après les mesures actinométriques de Varsovie.

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 19. Sur les erreurs d'observation dues à la non-égalité des intervalles de temps.....                                                    | 57 |
| § 20. Sur les erreurs des lectures thermométriques.....                                                                                    | 61 |
| § 21. Résultats généraux de la théorie des erreurs.                                                                                        | 64 |
| § 22. Méthode de formation des valeurs définitives de $\omega$ .....                                                                       | 69 |
| § 23. Sur les erreurs accidentelles probables des valeurs relatives de la radiation, d'après les mesures actinométriques de Varsovie ..... | 71 |

CHAPITRE V. — Sur les indications des pyrhéliomètres électriques de compensation, employés à Varsovie.

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 24. Littérature de l'appareil.....                                                                                                  | 74 |
| § 25. Formules fondamentales .....                                                                                                    | 75 |
| § 26. Pyrhéliomètre N. 43, employé à Varsovie..                                                                                       | 78 |
| § 27. Pyrhéliomètres N. 52 et N. 52 <i>bis</i> .....                                                                                  | 80 |
| § 28. Sur les erreurs probables des mesures pyrhéliométriques .....                                                                   | 82 |
| § 29. Sur la formation des moyennes de la radiation et sur les erreurs accidentelles probables des valeurs particulières de $Q$ ..... | 85 |
| § 30. Matériaux pyrhéliométriques recueillis à Varsovie .. .....                                                                      | 87 |

CHAPITRE VI. — Comparaison des pyrhéliomètres avec les actinomètres et degré de précision des données actinométriques en gr. cal.

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 31. Sur la variabilité du coefficient de transmission de l'actinomètre du système Ångström-Chwolson..... | 89 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 32. Valeurs des coefficients de transmission<br>pour les actinomètres de Varsovie..... | 90 |
| § 33. Sur le degré de précision des données acti-<br>nométriques en gr. cal.....         | 95 |

### **Partie B.**

|                                                                                                   |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Sur la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire<br>et sur les sommes de chaleur..... | 99-186 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|

#### **CHAPITRE VII. — Sur les réductions fondamentales pour les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire.**

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 34. Matériaux actinométriques recueillis à Var-<br>sovie pendant les années 1901-1903.....                                                                                                           | 101 |
| § 35. Sur les variations de l'intensité du rayonne-<br>ment solaire ( $\Delta Q$ ) dépendant de la hauteur du<br>soleil $h$ , d'après les mesures faites à Varsovie.                                   | 104 |
| § 36. Sur les variations de l'intensité du rayon-<br>nement solaire, dépendant de la hauteur du<br>soleil, à Guimar (île océanique de Ténériffe), à<br>Zakopane (Pologne) et à Treurenberg (Spitzberg) | 107 |
| § 37. Valeurs de la réduction à la hauteur du<br>soleil, pour Varsovie.....                                                                                                                            | 110 |
| § 38. Sur la réduction à la distance moyenne de<br>la terre au soleil.....                                                                                                                             | 113 |
| § 39. Evaluation empirique des variations de l'in-<br>tensité du rayonnement solaire à Varsovie,<br>dues à l'influence de l'humidité absolue.....                                                      | 114 |
| § 40. Sur les variations de l'intensité du rayon-<br>nement solaire avec l'humidité absolue, d'après<br>les mesures faites à Treurenberg (Spitzberg)...                                                | 117 |

#### **CHAPITRE VIII. — Sur les valeurs diurnes, mensuelles et annuelles du rayonnement solaire à Varsovie, pendant la période 1901-1905.**

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 41. Sur les valeurs les plus élevées et sur la formation des valeurs diurnes de l'intensité du rayonnement.....   | 122 |
| § 42. Sur la formation des moyennes mensuelles.....                                                                 | 125 |
| § 43. Tables mensuelles des mesures actinométriques de Varsovie, pour la période 1901-1905.                         | 128 |
| § 44. Résumés annuels des mesures de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie.....                             | 133 |
| § 45. Remarque sur la formation des moyennes mensuelles $Q$ , d'après les nombres égaux de jours d'observation..... | 137 |

CHAPITRE IX. — Sur le résumé annuel moyen pour les cinq années 1901-1905 à Varsovie et sur la marche de la dépression du rayonnement solaire pendant cette période.

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 46. Sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie.                                             | 139 |
| § 47. Quelques renseignements sur la dépression de l'intensité du rayonnement solaire dans la période de décembre 1902 à février 1904..... | 141 |
| § 48. Résumé annuel moyen pour les cinq années 1901-1905, à Varsovie.....                                                                  | 143 |
| § 49. Sur les valeurs maxima de l'intensité du rayonnement solaire.....                                                                    | 145 |
| § 50. Sur la marche de la dépression du rayonnement solaire à Varsovie.....                                                                | 147 |

CHAPITRE X. — Sur un schéma numérique pour Varsovie et sur le caractère des variations annuelles de l'intensité du rayonnement solaire dans quelques autres endroits.

|                                            |  |
|--------------------------------------------|--|
| § 51. Essai d'un schéma numérique pour les |  |
|--------------------------------------------|--|

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| variations annuelles de l'intensité de la radiation à Varsovie.. . . . .                                                                               | 151 |
| § 52. Sur le caractère des variations à Treurenborg (Spitzberg).....                                                                                   | 156 |
| § 53. Remarques sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire, d'après les résultats des mesures pyrhéliométriques..... | 158 |
| § 54. Remarques sur le caractère de la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire, d'après les résultats des mesures actinométriques .....  | 162 |
| CHAPITRE XI. — Sur les sommes de la chaleur, en gr. cal.                                                                                               |     |
| § 55. Valeurs de l'insolation et constante solaire.                                                                                                    | 167 |
| § 56. Sur le calcul des sommes de la chaleur qui serait reçue à la surface du sol à Varsovie, si le ciel était constamment dégagé.....                 | 170 |
| § 57. Sur le calcul du composant vertical de la chaleur, pour Varsovie.....                                                                            | 175 |
| § 58. Durée de l'insolation et sommes de la chaleur réellement reçue à Varsovie en 1903, 1904 et 1905.....                                             | 176 |
| § 59. Sommes de la chaleur, d'après les mesures faites à Treurenborg (Spitzberg).....                                                                  | 182 |
| § 60. Données pour Montpellier et résumé des sommes de la chaleur.....                                                                                 | 184 |
| BIBLIOGRAPHIE.....                                                                                                                                     | 187 |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                                                                               | 197 |
| ERRATA.....                                                                                                                                            | 203 |
| PLANCHE I.                                                                                                                                             |     |
| PLANCHE II.                                                                                                                                            |     |

---

# ERRATA

---

| Page | ligne                  | au lieu de                | doit être                   |
|------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 9    | 1 <sup>re</sup>        | de                        | à                           |
| 10   | formules (14)          | $T' = T'_0 e^{mt}$        | $T' = T'_0 e^{-mt}$         |
| 15   | 3 <sup>me</sup>        | employées                 | employée                    |
| 22   | 4 <sup>me</sup> (note) | exprimée                  | exprimées                   |
| 26   | Exemple numérique      | $\theta_1 = -1^{\circ}23$ | $\theta_1 = +1^{\circ}23$   |
| 39   | 11 <sup>me</sup>       | évidemment                | dans le cas qui nous occupe |
| 78   | 5 <sup>me</sup>        | N. 18                     | N. 13                       |

---



# Planche I.

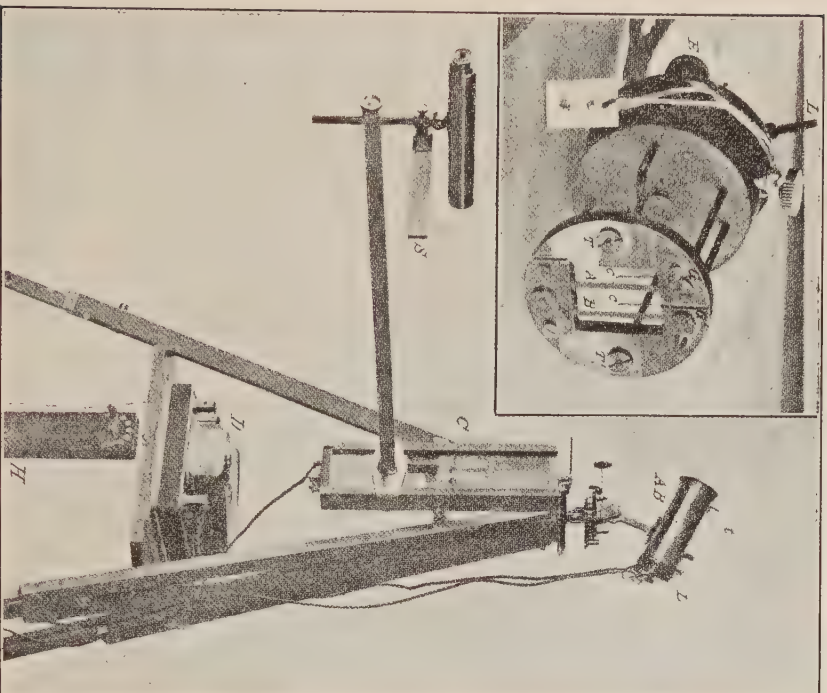


Fig. 1. — Pyrhéliomètre électrique de compensation.

## Remarques :

- a) Pour la description du pyrhéliomètre voir chap. V (pp. 75-82).
- b) Pour les diverses parties de l'actinomètre voir § 6 et § 7 (chap. II) ; pour la méthode des mesures voir § 10 (pp. 24-27).

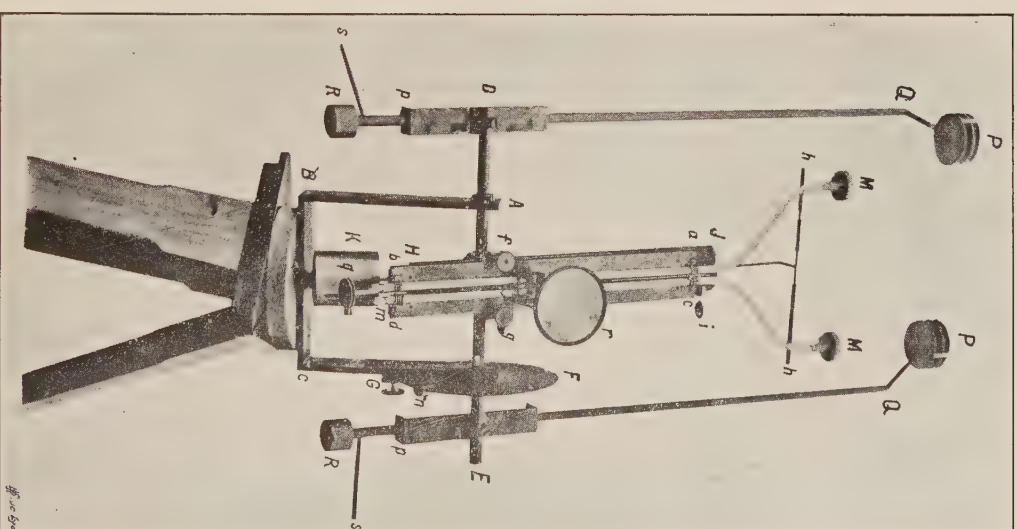
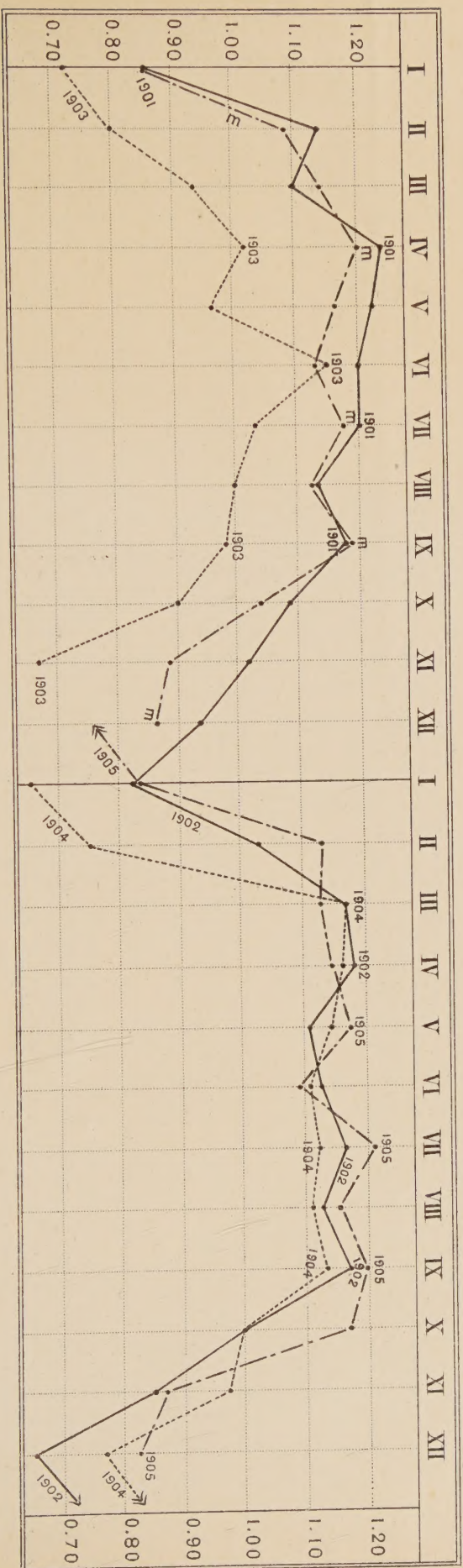


Fig. 2. — Actinomètre du système Ångström-Chwolson  
(type de construction de 1893).



*Variations mensuelles de l'intensité du rayonnement solaire à Varsovie, pendant la période 1901-1905.*



N. B. — Les courbes des années 1901, 1902, 1903, 1904 et 1905 sont tracées d'après la Table XIII (colonne 2) et la courbe moyenne (m) d'après la Table XVI (col. 2).





